

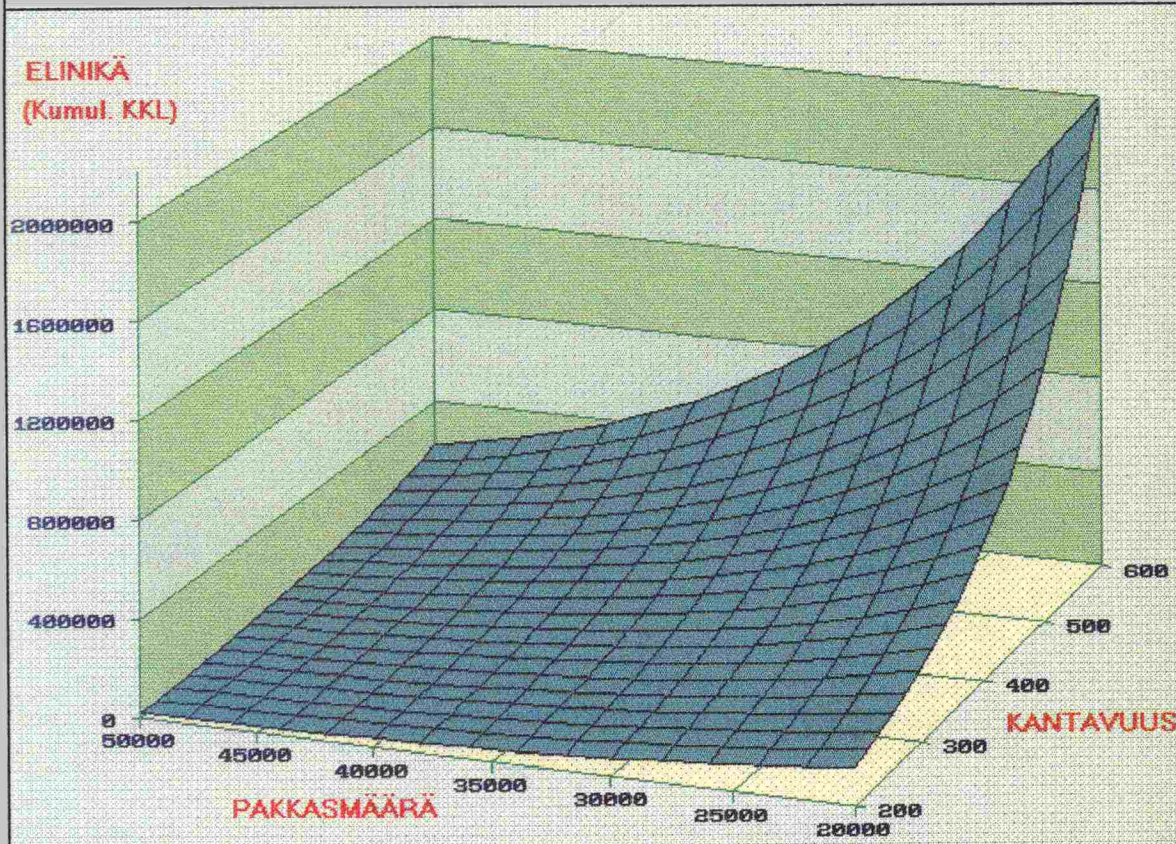


Tielaitos

Heikki Jämsä, Harri Spoof, Antti Ruotoistenmäki

Strategic Highway Research Program (SHRP) Long-Term Performance of Pavements (LTPP)

Materiaalimoduulien määrittäminen takaisinlaskentaohjelmilla
sekä tierakenteen vaurioitumisajankohdan ennustemallit



Tielaitoksen
selvityksiä

3/1994

Helsinki 1994

Geokeskus
VTT/YKI

Tielaitoksen selvityksiä
3/1994

Heikki Jämsä, Harri Spoof, Antti Ruotoistenmäki

**Strategic Highway Research Program (SHRP)
Long-Term Performance of Pavements (LTPP)**

Materiaalimoduulien määrittäminen takaisinlaskentaohjelmilla
sekä tierakenteen vaurioitumisajankohdan ennustemallit

Tielaitos
Geokeskus
VTT/YKI

Helsinki 1994

ISSN 0788-3722
ISBN 951-47-8772-2
TIEL 3200213
Painatuskeskus Oy
Helsinki 1994

Julkaisua kustannus ja myynti:
Tielaitos, hallinnon palvelukeskus,
painotuotepalvelut
Telefax (90) 1487 2652

Tielaitos
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puh. vaihde (90) 148 721

JÄMSÄ, Heikki; SPOOF, Harri; RUOTOISTENMÄKI, Antti: Strategic Highway Research Program (SHRP), Long-Term Performance of Pavements (LTPP). Materiaalimoduulien määrittäminen takaisinlaskentaohjelmilla sekä tierakenteen vaurioitumisajankohdan ennustemallit.

Helsinki 1994, Tielaitos, Geokeskus, Tielaitoksen selvityksiä 3/1994, 63 s. +liitteet, ISBN 951-47-8772-2, ISSN 0788-3722, TIEL 3200213

Avainsanat koetie, rakenteen käyttäytyminen, kantavuus, vaurioituminen, mallintaminen, vaurioennuste, kestoikä, moduuli, muodonmuutos, takaisinlaskenta

Tiivistelmä

Tierakenteen analyttisessä mitoituksessa käytettävät ohjelmistot edellyttävät lähtötietoina rakennekerrosten materiaalimoduulien arvoja. Nämä määritettiin 43 SHRP-koetieltä pudotuspainolaitteen mittaustulosten perusteella käyttäen hyväksi Modulus- ja Elmod-takaisinlaskentaohjelmia. Eri ohjelmien tuottamia kerrosmoduulien arvoja verrattiin keskenään. Modulus-ohjelma antaa suurempia asfaltin moduulin arvoja, kun taas Elmodilla saadaan suurempia sitomattomien rakennekerrosten ja pohjamaan moduuliarvoja. Asfaltin moduulin variaatiokerroin (CV) oli yhtä suuri molemmilla ohjelmilla lasketuilla tuloksilla. Sitomattomien kerrosten ja pohjamaan moduulin vaihtelu oli suurempaa Modulus-laskemissa kuin Elmod-laskelmissa.

Jännitystason vaikutusta materiaalimoduuleihin tutkittiin laskemalla rakennekerrosmoduulit neljällä eri kuormitustasolla. Tiehen kohdistuva voima vaihteli välillä 27-71 kN. Kantavan kerroksen materiaali osoitti suurinta jännitysriippuvuutta. Tämä johtuu siitä, että jännitystaso ja sen muutos on suurempi kantavassa kerroksessa kuin jakavassa kerroksessa ja pohjamaassa. Jännitysriippuvuus on Elmodissa suoraviivaisempaa kuin Moduluksessa. Kaikilla rakennekerroksilla moduuli kasvoi jännitystason noustessa, kun taas Modulus-laskelmissa tapahtui myös moduulin laskua jännitystason noustessa. Pohjamaa käyttäytyi samaan tapaan molemmilla ohjelmilla, yleensä kitkamaalajeilla moduuli kasvoi jännitystason noustessa. Koheesiomaalajeilla tapahtui useammin moduulin nousua kuin laskua jännitystason noustessa, mikä ei vastaa koheesiomaalajien tunnettua käyttäytymistä. Tähän on syynä kohteiden pohjamaan yläpuolella oleva korkea penger, johon suurin osa kuormituksesta kohdistui.

Molemmilla ohjelmilla lasketut kantavan kerroksen moduulit eri jännitystasoilla vastaavat melko hyvin vastaaville materiaaleille laboratoriossa dynaamisella kolmiakselialikokeella määritettyjä moduuleja.

Kriittiset muodonmuutokset laskettiin lineaaris-elastisella monikerrosohjelmalla (BISAR) käyttäen Modulus-ohjelmalla takaisinlaskettuja rakennekerrosmoduuleja sekä Elmod-ohjelmalla, joka laskee muodonmuutokset Boussinesqin yhtälöillä. Kahdella eri menetelmällä lasketut asfaltin alapinnan venymät ja pohjamaan yläpinnan puristumat vastasivat hyvin toisiaan.

Eloonjäämisanalyysi soveltuu menetelmänä päällysteen ensimmäisen vaurion syntyajankohdan mallintamiseen varsin hyvin. Eloonjäämisanalyysin elinajan käsitettä vastaa aika tien rakentamisesta ensimmäisen halkeaman ilmaantumiseen. Eloonjäämisanalyysille tyypillinen piirre on, että kaikkia koeteiden elinaikoja ei tunneta tarkasti (sensoroidut havainnot). Osassa tieosuuksia on vaurioita jo tarkastelujakson alussa (vasemmalle sensoroitu), osassa ensimmäiset vauriot syntyvät tarkastelujakson aikana ja osassa vaurioita ei ilmene lainkaan (oikealle sensoroitu).

Tutkimuksen tuloksena on kehitetty elinkaarianalyysiin perustuvia ennustemalleja, joiden avulla voidaan arvioida kumulatiivisen kuormituskertaluvun määrä, jolloin tielle syntyy ensimmäinen verkko- tai pituushalkeama. Mallien selittävinä muuttujina ovat rakenteelliset tekijät (kerrosten paksuudet ja moduulit), muodonmuutokset, kantavuus sekä ilmastolliset tekijät (pakkasmäärä). Kestoiän arviointi perustuu erilaisiin yhden ja kahden muuttujan malleihin.

Ennustemalleja voidaan hyödyntää mm. tieverkon kunnon (esim. kantavuus, vaurioinventointi) mittausajankohdan ja kunnossapitotoimenpiteiden ajoituksen määrittämisessä. Mitä lähempänä tien kumulatiivinen kuormituskertaluku on vaurioitumisen ennustettua alkamisajankohtaa, sitä tarkemmin ja useammin tulisi tien kunnon muuttumista seurata. Vastaavasti tien kuntomittauksia voidaan vähentää niiden teiden osalta, joissa ei ole odotettavissa vaurioitumista lähivuosina, johtaen alhaisempiin tieverkon kunnon inventointikustannuksiin.

Alustavien vaurioitumismallien käyttökelpoisuus tulisi testata riippumattomalla aineistolla. Tähän tarkoitukseen on olemassa kotimaista ja ulkomaista havaintotieaineistoa, jota on kerätty 1980-luvun alusta lähtien. Myös tieverkolta kerättävien kuntotietojen ja tien rakentamistietojen hyödyntämisellä saadaan riippumatonta aineistoa mallien testaamiseksi. Jatkossa aikasarjahavaintojen lukumäärän kasvaessa tullaan kehittämään vaurioiden kasvua ennustavat mallit.

Alkusanat

Suomi ja muut Pohjoismaat (Ruotsi, Norja, Tanska) osallistuvat yhteistyössä Yhdysvalloissa käynnissä olevaan Strategic Highway Research Program (SHRP) tutkimusohjelman Long-Term Pavement Performance (LTPP) projektiin.

Pohjoismaiden LTPP-tutkimuksen tavoitteena on paikallisiin olosuhteisiin soveltuvien tien rakenteellisten kestoikämallien kehittäminen. Tutkimus toteutetaan valitsemalla tieverkolta koetietä SHRP:n ohjeiden mukaisesti. Tällä varmistetaan Yhdysvalloista saatujen tulosten hyvyys ja käyttökelpoisuus, jota voidaan testata riippumattomalla Pohjoismaisella aineistolla.

Koeteiden valinta ja seuranta on aloitettu Suomessa 1990-91. Tällä hetkellä on käytävissä jo 3-4 vuoden tulokset useimmilta koeteiltä. Tämä mahdollistaa ensimmäiset realistiset analyysit vaurioitumista selittävien tekijöiden selvittämiseksi sekä vauriomallien laatimiseksi. Jatkossa tullaan kehittämään Pohjoismaiset vauriomallit, joissa hyödynnetään muista maista kerätyt aineistot. Lisäksi analyysissä hyödynnetään Yhdysvalloissa kehitettyjä malleja.

Tielaitoksen puolesta tutkimusta ovat valvoneet ja ohjanneet apulaisjohtaja Aarno Valkeisenmäki ja ylitarkastaja Reijo Orama geokeskuksesta. Tutkimusraportista ovat Valtion teknillisessä tutkimuskeskuksessa vastanneet tekn.lis. Heikki Jämsä, tutk.ins. Harri Spoof, tutk.ins. Seppo Koivisto ja dipl.ins. Antti Ruotoistenmäki.

Sisältö

1	JOHDANTO	7
2	KOETIET	8
3	TAKAISINLASKENTA-OHJELMIEN LASKENTAPERIAATTEET	9
3.1	Yleistä	9
3.2	Modulus	9
3.3	Elmod	11
4	PUDOTUSPAINOMITTAUKSET JA LÄHTÖTIEDOT TAKAISINLASKENTA-OHJELMIIN	14
5	KERROSMODUULIT STANDARDIPYÖRÄKUORMALLA	16
5.1	Kahdella ohjelmalla laskettujen moduulien vertailu	16
5.2	Mitattujen ja laskettujen taipumien virhetarkastelu	23
5.3	Takaisinlaskettujen kerrosmoduulien hajonta	24
6	RAKENNEKERROSMATERIAALIEN JÄNNITYSRIIPPUVUUS	27
7	KRIITTISTEN MUODONMUUTOSTEN LASKEMINEN ERI MENETELMILLÄ	39
8	VAURIOITUMISEN MALLINTAMINEN	42
8.1	Mallintamisen lähtökohdat	42
8.2	Vaurioitumisajankohdan mallintaminen	42
8.2.1	Mallintamisen periaatteet	42
8.2.2	Muuttujien valinta	45
8.2.3	Vaurioitumisajankohtaa selittävät yhden muuttujan mallit	46
8.2.4	Vaurioitumisajankohtaa selittävät kahden muuttujan mallit	48
9	JOHTOPÄÄTÖKSET	59
10	KIRJALLISUUSLUETTELO	61
11	LIITTEET	63

1 JOHDANTO

Tien rakenteellinen vaurioituminen on monitahoinen prosessi, johon vaikuttavat liikenne- ja ilmastorasitukset sekä näiden yhteisvaikutukset samoin kuin tien rakenteelliset ominaisuudet (materiaalit, kerrospaksuudet, pohjamaa). Näiden tekijöiden tunteminen on perusedellytyksenä tierakenteen käyttäytymisen hallitsemiselle sekä vaurioitumismallien laadinnalle.

Tierakenteen käyttäytymisen mallintaminen edellyttää koeteiden rakennekerrosten paksuuksien ja materiaalimoduulien tuntemista. Kerrospaksuudet on saatu koeteille tehdyistä koekuopista. Materiaalimoduulit on määritetty pudotuspainolaitteen tulosten analysoinnissa käytettävien takaisinlaskentaohjelmistojen avulla.

Tierakenteen vaurioitumismallien laadinta on kaksivaiheinen tapahtuma, jossa ensin määritetään tien rakentamisajankohdan ja ensimmäisen vaurion välinen aikaväli. Tämän jälkeen mallinnetaan vaurion etenemistä ehdolla, että vaurioituminen on alkanut. Tällöin voidaan ottaa huomioon tierakenteen ominaisuuksissa tapahtuneet muutokset halkeamisen seurauksena, jolloin päällyste ei enää toimi yhtenä liikennekuormitusta jakavana laattana.

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan koeteiden materiaalimoduulien määrittämistä sekä vaurioiden syntymisajankohtaan liittyvien mallien kehittämistä.

2 KOETIET

Suomen SHRP-koetiet käsittävät sekä AB + kant. (asfalttikonipäällyste sitomattomalla alustalla, GPS-1) että 2AB + kant. (uudelleenpäällystetty asfalttikonipäällyste sitomattomalla alustalla, GPS-6) rakenteet. Rakenteiden määrittelyssä on otettu huomioon vaiherakentaminen siten, että yhdeksi päällystekerraksi lasketaan lyhyen ajan sisällä peräkkäin (esim. 2-3 vuoden välein) tehdyt päällysteet edellyttäen, että ensimmäinen päällystekerros ei ole vaurioitunut ennen uudelleenpäällystystä.

Koeteiden valinnassa on hyödynnetty tilastollisen koesuunnittelun periaatteita. Tämän tarkoituksena on ohjata kohteiden valintaa siten, että olemassa olevat riippuvuudet tien vaurioitumisen ja niitä selittävien muuttujien välillä löydetään mahdollisimman suurella todennäköisyydellä. Koeteiden valintaan liittyviä periaatteita sekä koeteiden ominaisuuksia on käsitelty viitteessä /3/. Liitteessä 1 on esitetty tutkimukseen kuuluvat koetiet.

3 TAKAISINLASKENTA-OHJELMIEN LASKENTAPERIAATTEET

3.1 Yleistä

Pudotuspainolaitteella mitataan liikennekuormaa simuloivan dynaamisen kuorman rakenteeseen aiheuttama taipumasuppilo. Mitatusta taipumasuppilosta määritetään ns. takaisinlaskentaohjelmia käyttäen rakennekerrosten in-situ muodonmuutosmoduulit. Käytävissä on useita takaisinlaskentaohjelmia, jotka soveltavat erilaisia ratkaisumenetelmiä. Tässä tutkimuksessa verrataan kahden erilaista ratkaisumenetelmää käyttävän takaisinlaskentaohjelman, Moduluksen /1/ ja Elmodin /2/, antamia tuloksia.

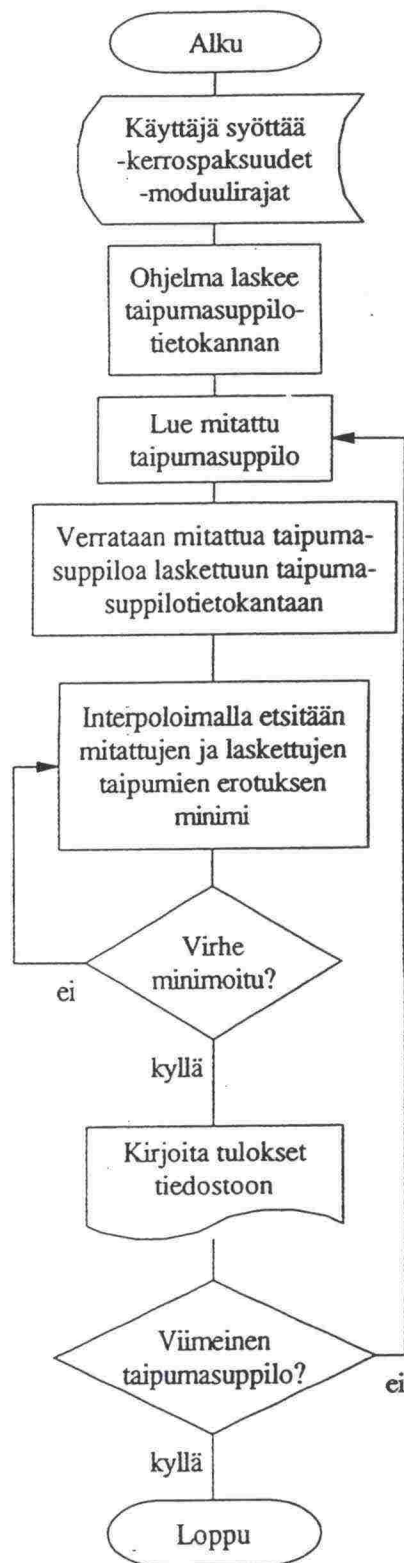
Modulus-ohjelmaa käytetään SHRP-LTPP tutkimuksessa pudotuspainolaitteen mittaustulosten käsittelyyn. Ohjelma käyttää lineaarista monikerrosteoriaa. Modulus-ohjelmaa on myös käytetty tässä tutkimuksessa mallien lähtötietoina tarvittavien kerrosmoduulien määrittämiseen. Malleissa lähtötietoina käytettävät kriittiset muodonmuutokset on laskettu lineaarisella monikerrosohjelmalla (BISAR) käyttäen lähtöarvoina Modulus-ohjelmalla takaisinlaskettuja kerrosmoduulien arvoja.

SHRP-LTPP koeteiden rakennekerrosten muodonmuutosmoduulit ja kriittiset muodonmuutokset laskettiin myös Elmod-ohjelmalla. Siinä käytetään ekvivalenttikerrospaksuuksien menetelmää (MET) ja Boussinesqin yhtälöitä jännitysten, muodonmuutosten ja siirtymien laskemiseen. Seuraavassa on selostettu lyhyesti molempien ohjelmien laskentaperiaatteita.

3.2 Modulus

Modulus-ohjelmassa kerrosmoduulien arvot etsitään sovittamalla mitatut taipumasuppilot lineaarisella monikerrosohjelmalla laskettuihin taipumasuppiloihin. Ohjelman laskentaperiaatteita on selostettu viitteessä /3/.

Kuvassa 1 on esitetty Modulus-ohjelman yksinkertaistettu toimintakaavio. Lähtötietoina ohjelmaan syötetään kerrospaksuudet ja rajat kerrosmoduulien arvoille. Ohjelma lukee mitatut taipumat tiedostosta. Interpoloimalla etsitään kullekin mitatulle taipumasuppilolle kerrosmoduulien yhdistelmä, jolla saavutetaan mitattujen ja laskettujen taipumien välisen erotuksen neliön minimi. Tulokset kirjoitetaan tiedostoon myöhempiä käsittelyä varten.



Kuva 1:

Modulus-takaisinlaskentaohjelman toimintakaavio /1/.

3.3 Elmod

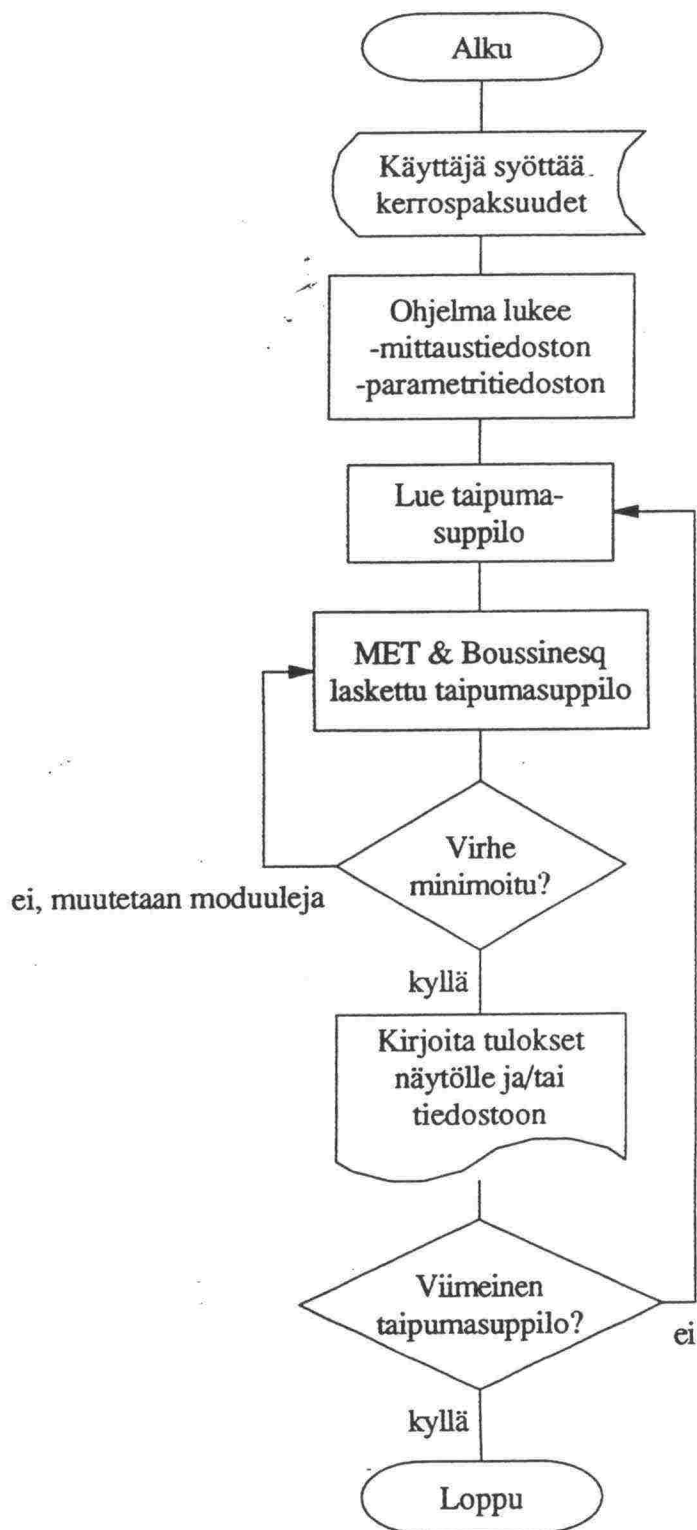
Elmod on iteratiivinen takaisinlaskentaohjelma. Mitattuja taipumasuppiloita verrataan Boussinesqin yhtälöillä laskettuihin taipumasuppiloihin. Käyttäjän antamat lähtötiedot kerrospaksuudet sekä valinnaisesti suurimman arvon kovan pohjan vastinsyvyydelle ja kiinteän arvon asfaltin jäykkäysmoduulille.

Elmod-ohjelman yksinkertaistettu toimintakaavio on esitetty kuvassa 2. Ohjelma lukee levyiltä taipumanmittaustiedoston ja laskentaa varten etukäteen määritellyn parametritiedoston. Kullekin taipumasuppilolle haetaan iteroimalla sellainen kerrosmoduulien yhdistelmä, jolla mitatut ja lasketut taipumat vastaavat mahdollisimman hyvin toisiaan. Tien rakennekerrokset ja pohjamaa yhdistetään Odemarkin /4/ vastinpaksuusmenetelmällä lineaaris-elastiseksi puoliavaruudeksi, jonka taipumat lasketaan Boussinesqin yhtälöillä. Maa oletetaan isotrooppiseksi ja homogeeniseksi. Vastinpaksuudet lasketaan yhtälöstä (vrt. kuva 3) /4,2/:

$$h_e = n \cdot h_i \cdot \sum_i \sqrt[3]{\frac{E_i \cdot (1 - \mu_m^2)}{E_m \cdot (1 - \mu_i^2)}} \quad (1)$$

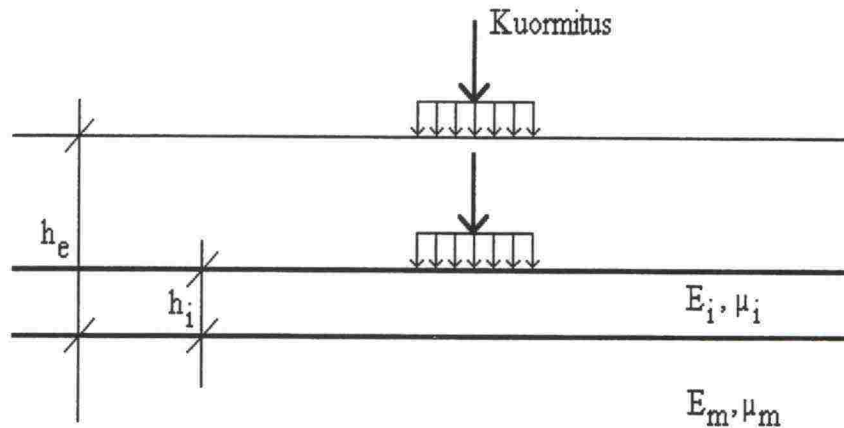
missä	h_e on	kerroksen vastinpaksuus
	n	korjauskerroin, $n = 0,8-1,0$
	h	kerroksen alkuperäinen paksuus
	E_i	kerroksen alkuperäinen moduuli
	E_m	pohjamaan moduuli
	μ_i	kerroksen Poisson-luku
	μ_m	pohjamaan Poisson-luku

Kaikkien materiaalien Poissonin luvuksi oletetaan $\mu=0,35$, joten se häviää yhtälöstä (1). Kerroksellinen rakenne muutetaan vastinrakenteeksi, jolla on sama jäykkyys (EI) kuin alkuperäisellä rakenteella, mutta yksi moduuliarvo E, ts. sen vastinpaksuus on suurempi kuin rakennekerrosten yhteenlaskettu paksuus. Vastinrakenteen taipumat lasketaan Boussinesqin yhtälöillä. Mitattuja taipumia verrataan laskettuihin taipumiin. Jos ne eivät vastaa riittävän hyvin toisiaan, moduuliarvoja muutetaan, lasketaan uusi vastinpaksuus ja uudet taipumat. Iterointia jatketaan, kunnes mitatut ja lasketut taipumat vastaavat riittävän hyvin toisiaan.



Kuva 2:

Elmod-takaisinlaskentaohjelman toimintakaavio.



Kuva 3: Odemarkin vastinpaksuusmenetelmä /4/.

Elmod ottaa huomioon pohjamaan epälineaarisuuden kaavan (2) avulla /2/:

$$E_{sg} = C_0 * \left(\frac{\sigma_1}{\sigma'} \right)^n \quad (2)$$

missä	E_{sg} on	pohjamaan moduuli
	σ_1	suurin pääjännitys (pystysuora)
	σ'	vertailujännitys (100 kPa)
	C_0, n	kertoimia, $n < 0$

Käyttäjä voi lähtötietovalikossa syöttää suurimman vastinsyvyuden kovaan pohjaan (kallioon tai muuhun jäykkään kerrokseen). Ohjelma laskee kullekin mittauspisteelle kovan pohjan vastinsyvyuden ja korjaa mitattua taipumasuppi-
loa. Pohjamaan moduuli määritetään Elmod-ohjelmassa kolmen viimeisen
anturin taipuman perusteella.

4 PUDOTUSPAINOMITTAUKSET JA LÄHTÖTIEDOT TAKAISINLASKENTA-OHJELMIIN

Pudotuspainomittaukset tehtiin lähteessä /5/ esitetyllä tavalla heinä-lokakuussa vuosina 1991-92. Pudotuspainomittausten tuloksista laskettiin rakennekerrosten muodonmuutosmoduulit kahdella ohjelmalla, Modulusella ja Elmodilla. SHRP:n takaisinlaskentaohjeita Modulus-ohjelman käyttöä varten /6/ noudatettiin kerrosmoduulien määrittämisessä. Samoja kerrospaksuuksia käytettiin Elmod-laskelmissa. Koekuoppien tekeminen ja havaitut kerrospaksuudet on esitetty lähteessä /3/.

Kerrosmoduulit on laskettu molemmilla ohjelmilla nelikerrosratkaisuna. Kaikki bitumilla sidotut kerrokset on käsitelty yhtenä kerroksena antamalla asfalttikerroksen paksuudeksi sidottujen kerrosten yhteispaksuus. Ohuille (alle 75 mm) asfalttikerroksille on yleensä annettu kiinteä jäykkyysmoduulin arvo molemmissa ohjelmissa. Takaisinlasketut asfaltin jäykkyysmoduulin arvot molemmista ohjelmista on lämpötilakorjattu $+21\text{ °C}$ ($+70\text{ °F}$) vertailulämpötilaan AASHTO:n suunnitteluohjeissa /7/ esitetyllä tavalla. Kaikkien kerrosten Poisson-luvun arvona käytettiin $\mu=0,35$ molemmilla ohjelmilla.

Ominaisuuksiltaan lähinnä samankaltaisia sitomattomia kerroksia on tarvittaessa yhdistetty. Useimmiten kantava kerros käsiteltiin omana kerroksenaan ja muut sitomattomat kerrokset yhdistettiin. Ohut (100-150 mm) kantava kerros on yhdistetty allaolevaan kerrokseen, mikäli sen takaisinlasketut moduuli-arvot vaikuttivat epärealistisen korkeilta.

Modulus-ohjelmassa käytettiin ohjelman laskemaa syvyyttä kovaan pohjaan. Elmod-laskelmissa ratkaisu haettiin useimmiten puoliäärettömälle pohjamaalle, koska kovan pohjan laskeminen aiheutti huomattavia eroja mitattujen ja laskettujen taipumien välille kerrosmoduulien kuitenkin muuttumatta merkittävästi.

Pohjamaan moduulille määritettiin Modulus-ohjelmaa varten lähtöarvo kaavoilla, joissa pohjamaan moduuli arvioidaan kauimmaisten anturien mittaaman taipuman perusteella /8/:

$$E_{sg} = -3.65435 + 24.398 \cdot \left(\frac{P}{D_3}\right) \quad (3)$$

$$E_{sg} = 20308 \cdot \frac{P}{D_r \cdot r}, \quad (4)$$

missä	E_{sg} on	pohjamaan moduuli, MN/m ²
	P	kuorma, kN
	D_3	tien pinnan taipuma 914 mm kuormituslevystä, µm
	D_r	tien pinnan taipuma etäisyydellä r kuormituslevystä, µm
	r	taipumanmittausanturin etäisyys kuormituslevystä, mm

Ensimmäinen kaava on Newcombin WSDOT:n suunnitteluohjetta varten laatima regressioyhtälö kolmikerrosrakenteelle. Se on saatu lineaarisella ohjelmalla simuloitujen taipumasuppiloiden perusteella. Jälkimmäinen yhtälö on Witczakin AASHTO:n suunnitteluohjeessa esittämä regressioyhtälö. Koska takaisinlasketut pohjamaan moduuliarvot olivat järjestelmällisesti pienempiä kuin kaavoilla (3) ja (4) saadut arvot, Modulus-ohjelmalle annettavaa pohjamaan moduulin lähtöarvoa pienennettiin.

Asfalttibetonin ja sitomattomien rakennekerrosten moduulien vaihteluvälit Modulus-ohjelmaan annettiin materiaaleilla tavallisesti esiintyvien vaihteluvälien mukaisina. Vaihtelurajat annettiin yleensä melko väljinä, koska kohteen sisällä samalla materiaalilla esiintyi melko paljon hajontaa.

5 KERROSMODUULIT STANDARDIPYÖRÄKUORMALLA

5.1 Kahdella ohjelmalla laskettujen moduulien vertailu

Modulus- ja Elmod- ohjelmilla takaisinlasketut kerrosmoduulit 50 kN pyöräkuormalla on esitetty kuvissa 4-7. Näissä ja kaikissa myöhemmissä kuvissa yksi piste edustaa yhden koetien tulosta, joka on koeosuuden 42 mittauspisteen keskiarvo.

Kuvasta 4 nähdään, että neljää kohdetta lukuunottamatta Moduluksella saadaan suurempia arvoja asfaltin moduulille kuin Elmodilla. Kuvasta nähdään myös, että molemmilla ohjelmilla lasketut asfaltin moduulit ovat suuruusluokaltaan järkeviä. Kuvan 4 arvot ovat +21 °C vertailulämpötilaan lähteen /7/ mukaan korjattuja arvoja. Asfaltin moduulin suunnitteluarvo on 2500 MN/m², mutta on oletettavaakin, että dynaamisesta kokeesta saadaan staattiseen levykuormituskokeeseen perustuvia suunnitteluarvoja suurempia arvoja. Tähän palataan myöhemmin tarkemmin. Moduuliarvojen vaihtelu välillä 2000-7000 MN/m² johtuu mm. kohteiden erilaisesta vauriomäärästä ja iästä. Lisäksi takaisinlaskentatulokset on kokonaisuus: yhden kerroksen moduulin arvo vaikuttaa muiden kerrosten moduuliin.

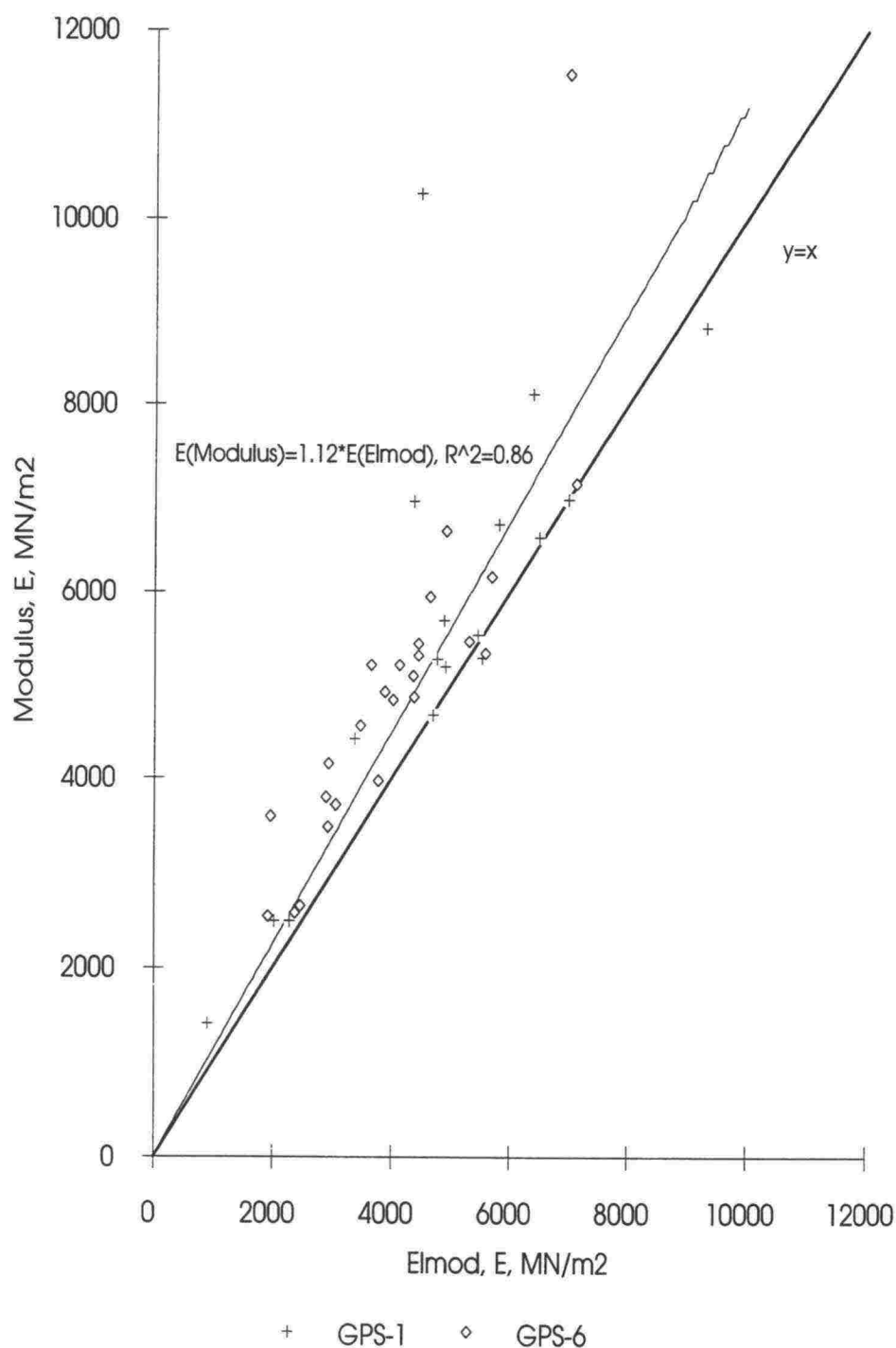
Kuvista 5-7 nähdään, että Elmodilla saadaan korkeampia sitomattomien kerrosten ja pohjamaan moduuliarvoja kuin Moduluksella. Tämä voi johtua siitä, että kerrosmoduulit määritetään Elmod-ohjelmassa alhaalta ylöspäin alkaen pohjamaasta. Elmodissa pohjamaan moduuliarvo määritetään kolmen kauimmaisen anturin taipuman perusteella. Tällä menettelyllä saadaan lähteiden /9/ ja /10/ mukaan liian korkeita pohjamaan moduuliarvoja. Vastavasti ohjelma laskee asfalttikerroksen moduulille pienemmän arvon.

Kuvista 5-7 nähdään myös, että sitomattomien kerrosten ja pohjamaan takaisinlasketut moduuliarvot vastaavat nykyisin käytössä olevia suunnitteluarvoja. Ne ovat tosin osittain, etenkin kantavan kerroksen osalta, melko korkeita verrattuna suunnitteluarvoihin. Tämä voi johtua osaltaan asfaltin moduulin yhteydessä mainitusta dynaamisen ja staattisen kokeen välisestä erosta. Se voi johtua myös siitä, että epälineaarisesti käyttäytyviä materiaaleja käsitellään analyysissä lineaarisina materiaaleina /11/.

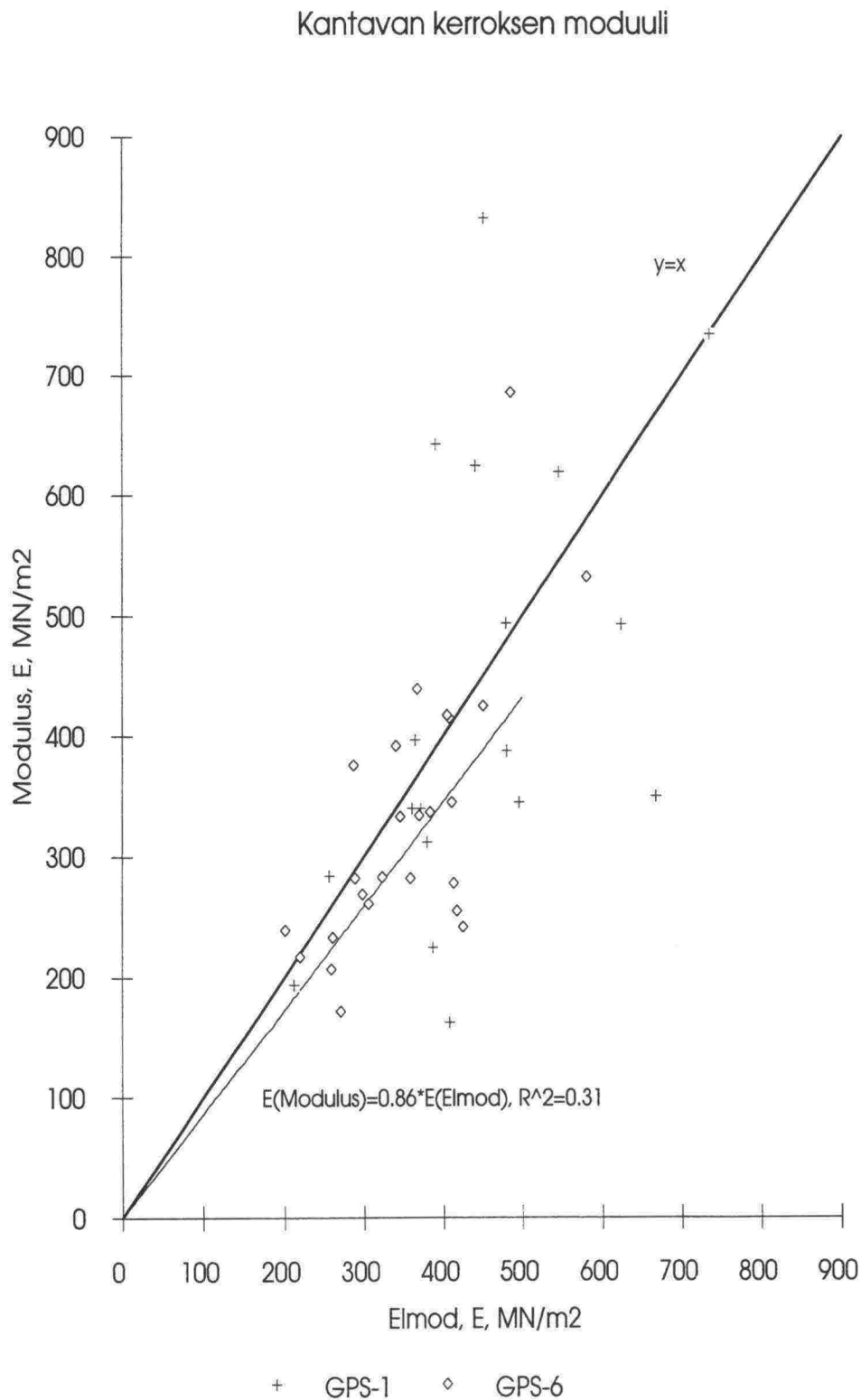
Mittaukset on tehty kesän ja alkusyksyn aikana, joten pohjamaan moduuliarvoja ei voida tältä osin verrata suoraan suunnitteluarvoihin, jotka edustavat kevätkantavuusarvoja, ts. vuoden heikointa tilannetta.

Moduluksella ja Elmodilla takaisinlaskettujen asfaltin moduulien välille kehitettiin lineaarinen riippuvuus:

Asfaltin jäykkäysmoduuli

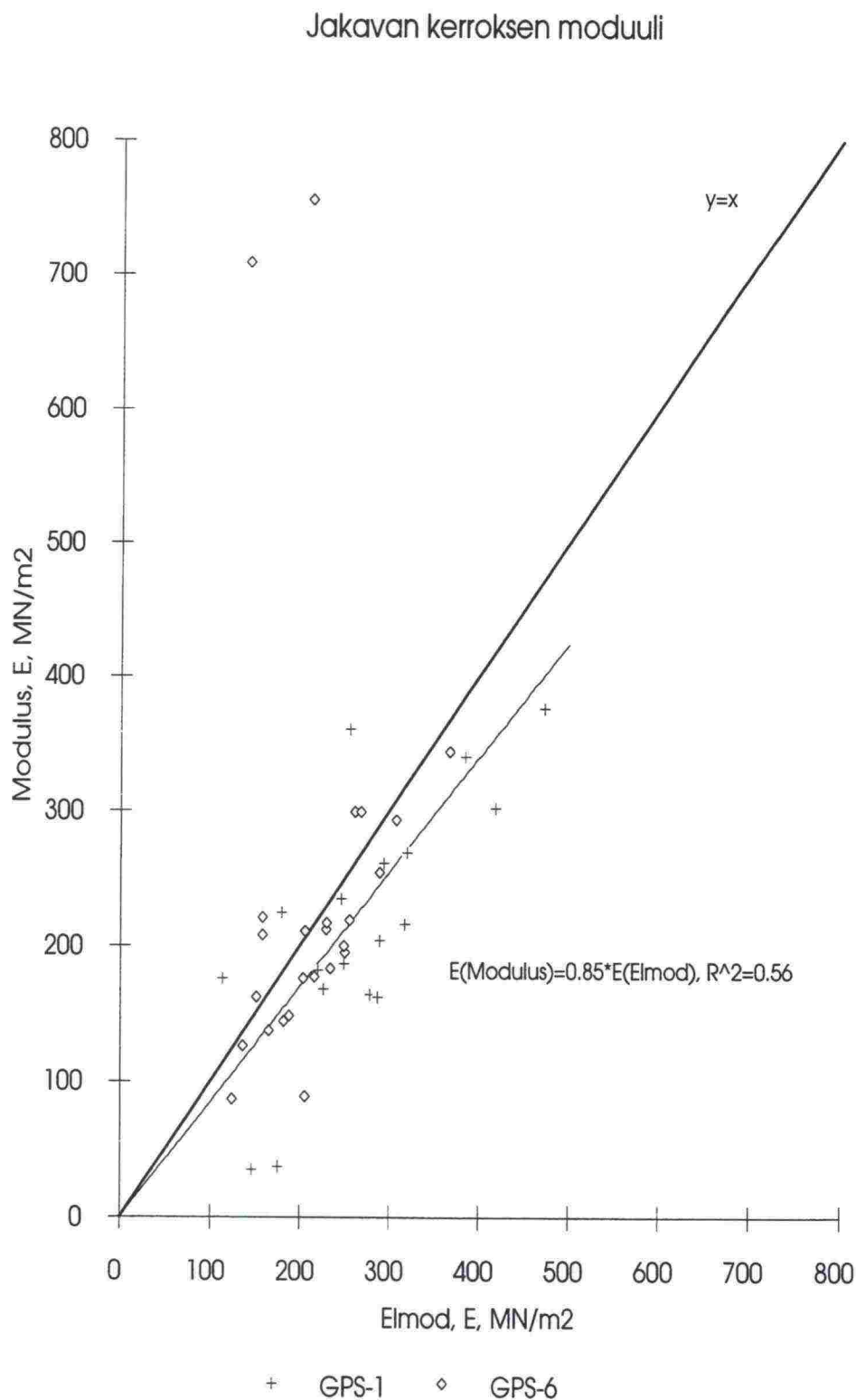


Kuva 4: SHRP-LTPP tutkimus. Takaisinlaskettu asfaltin moduuli Modulus- ja Elmod-ohjelmista.



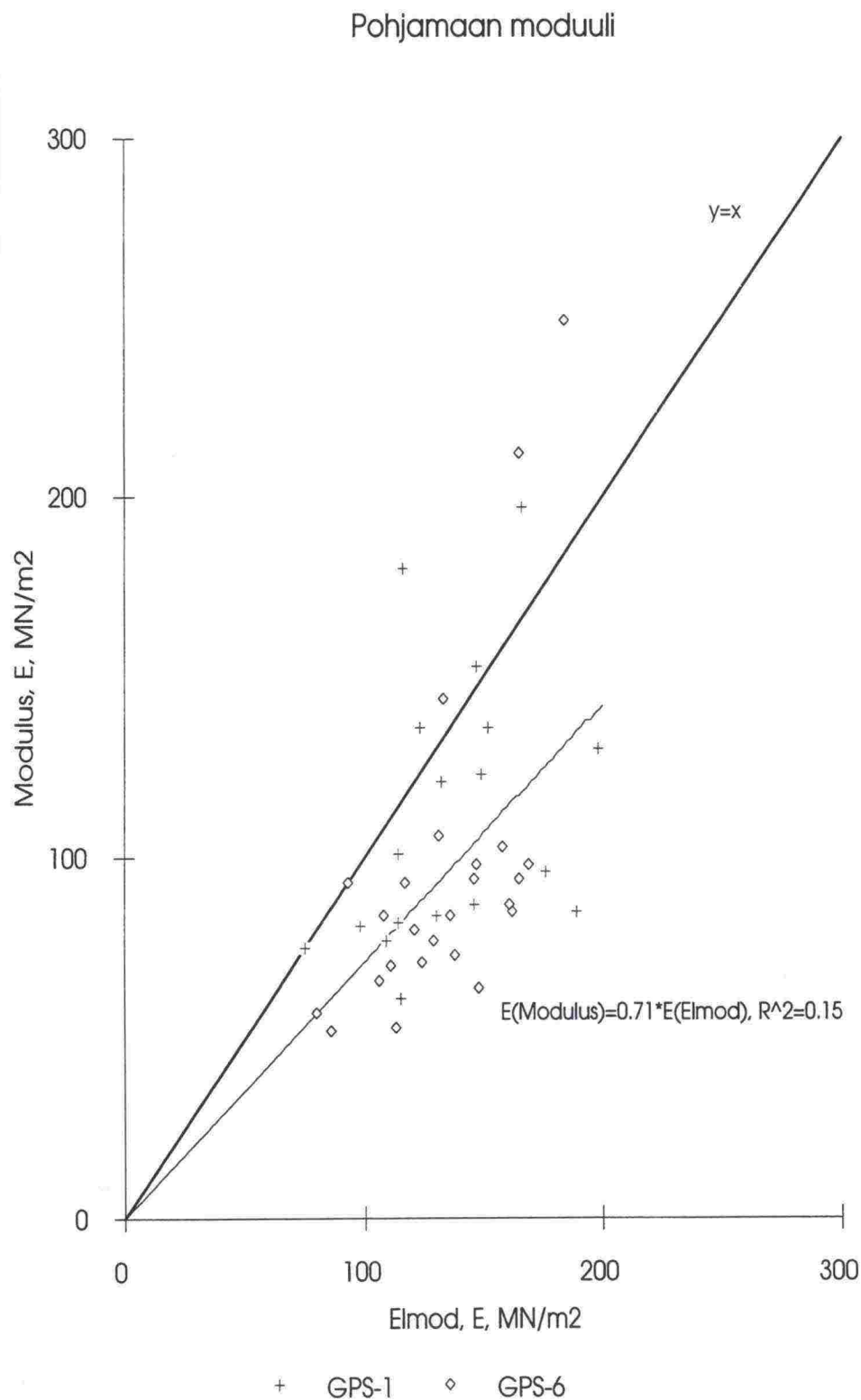
Kuva 5:

SHRP-LTPP tutkimus. Takaisinlaskettu kantavan kerroksen moduuli Modulus- ja Elmod-ohjelmista.



Kuva 6:

SHRP-LTPP tutkimus. Takaisinlaskettu jakavan kerroksen moduuli Modulus- ja Elmod-ohjelmista.



Kuva 7:

SHRP-LTPP tutkimus. Takaisinlaskettu pohjamaan moduuli
Modulus- ja Elmod-ohjelmista.

$$E_{Modulus} = 1.12 * E_{Elmod} \quad R^2 = 0.86 \quad (5)$$

missä $E_{Modulus}$ on Modulus-ohjelmalla takaisinlaskettu kerrosmoduuli
 E_{Elmod} Elmod-ohjelmalla takaisinlaskettu kerrosmoduuli

Kaksi pistettä, joiden moduuliarvo ylitti 10 000 MN/m², jätettiin pois kaavaa (5) määritettäessä. Kantavan ja jakavan kerroksen alle 500 MN/m² ja pohjamaan alle 200 MN/m² moduuliarvoja käyttäen (vrt. kuvat 5-7) kehitettiin kaavan (5) kaltaiset lineaariset riippuvuudet

kantavalle kerrokselle:

$$E_{Modulus} = 0.86 * E_{Elmod} \quad R^2 = 0.31 \quad (6)$$

jakavalle kerrokselle:

$$E_{Modulus} = 0.85 * E_{Elmod} \quad R^2 = 0.56 \quad (7)$$

pohjamaalle:

$$E_{Modulus} = 0.71 * E_{Elmod} \quad R^2 = 0.15 \quad (8)$$

Yhtälöiden (6)-(8) selitysasteet R^2 ovat melko huonoja, mikä osoittaa eri ohjelmilla laskettujen moduuliarvojen välistä hajontaa. Tarkoitus ei ollut muodostaa eri ohjelmien antamien tulosten välille tarkkaa yhteyttä, joka esimerkiksi pohjamaan tapauksessa olisi käyräviivainen, vaan antaa käsitys siitä miten eri ohjelmien antamat tulokset poikkeavat toisistaan. Nähdään, että suurin ero ohjelmien välillä on takaisinlasketussa pohjamaan moduulissa. Asfaltin moduulin yhteys on muutamaa hajontapistettä lukuunottamatta lähes lineaarinen, ts. Moduluksella lasketut asfaltin moduulit ovat kaikilla tasoilla suhteellisesti saman verran suurempia kuin Elmodilla lasketut arvot.

Kantavan ja jakavan kerroksen moduulien suhde (E_2/E_3) on joko ohjelman laskema tai käyttäjän määrittelemä vakio Elmod-ohjelmassa. Edellisessä tapauksessa yhtälöä (9) käytetään yhdessä vastinpaksuusmenetelmän (MET) kanssa kantavan ja jakavan kerroksen moduulien suhteen laskemiseen /2/:

$$\frac{E_g}{E_s} = 0.2 * h_g^{0.45} \quad (9)$$

missä E_g on sitomattoman kerroksen moduuli
 E_s pohjamaan moduuli
 h_g sitomattoman kerroksen paksuus

Tämän takia Elmod-ohjelmalla takaisinlaskettu kantavan kerroksen moduuli on aina suurempi kuin jakavan kerroksen moduuli. Moduulien suhde on myös sama jokaisessa mittauspisteessä. Tavanomaisella rakenteella tämän on osoitettu pätevän hyvin, mutta parannetuilla rakenteilla rakenteen keskelle saattaa jäädä vanha öljysorapäällyste tai kantava kerros, jonka päälle hienompirakeisesta materiaalista rakennettavan kerroksen moduuli saattaa olla pienempi kuin allaolevan kerroksen.

Kerrospaksuuksien vaihtelu aiheuttaa laskettujen moduuliarvojen vaihtelua. Jos esimerkiksi kerros on koeosuuden matkalla todellisuudessa paksumpi kuin koekuopasta havaittu ja ohjelmaan syötetty paksuus, takaisinlaskettu moduuliarvo saattaa olla epärealistisen korkea.

Pudotuspainolaite aiheuttaa tierakenteeseen dynaamisen kuormituksen, josta rakenteeseen aiheutuva taipuma vastaa dynaamisen liikennekuorman aiheuttamaa taipumaa, mutta on pienempi kuin staattisen kuormituksen (esim. levykuormituslaitteen) aiheuttama taipuma. Takaisinlaskentaohjelmat yleensä, kuten myös molemmat tässä tutkimuksessa käytetyt takaisinlaskentaohjelmat, laskevat kuitenkin rakenteen muodonmuutosmoduulit ikäänkuin pudotuspainolaitteen tiehen kohdistama voima olisi staattinen. Näin Modulus- ja Elmod-ohjelmilla lasketut moduuliarvot ovat korkeampia kuin staattiseen mittaukseen perustuvat suunnitteluarvot.

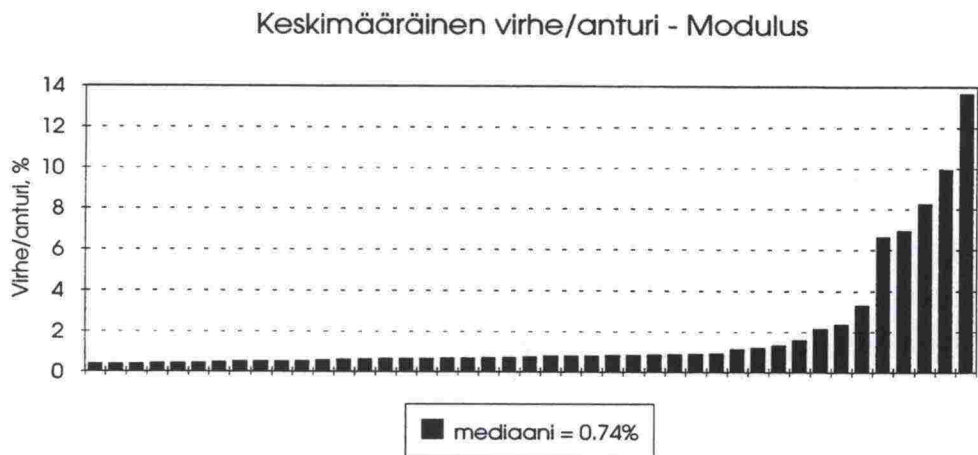
Pudotuspainolaite jäljittelee hyvin dynaamista liikennekuormitusta. Pudotuspainolaitteen tulosten tulkintaa kehitetään edelleen, jotta saadaan määritettyä rakennekerrosten materiaaliparametrit liikennekuormitusta vastaavassa kuormitustilanteessa. Näin rakenteiden suunnittelumenetelmiä saadaan tarkennettua.

Luvussa 8 esitettyjen mallien muodostamisessa on käytetty lähtötietoina mm. pudotuspainolaitemittauksista määritettyjä rakennekerrosten muodonmuutosmoduuleja ja lineaarisella monikerrosohjelmalla laskettuja kriittisiä muodonmuutoksia. Lähtötietoina lineaariseen ohjelmaan on käytetty takaisinlaskettuja kerrosmoduulien arvoja. Muodonmuutosten laskentaa on käsitelty tarkemmin luvussa 7. Vaikka takaisinlaskennan antamat moduuliarvot ovat osittain korkeampia kuin suunnitteluarvot, tämä ei vaikuta eri tekijöiden merkitsevyyksiin malleissa ja vaikutus mallin kertoiimiin on suhteellisen pieni. Käytetty laskentamenetelmä on sisäisesti yhtenäinen ja samanlainen kuin SHRP-LTPP-tutkimuksessa käytetty menetelmä, jolloin saatuja tuloksia voidaan suoraan vertailla kansainvälisen SHRP-LTPP -tutkimuksen antamiin tuloksiin.

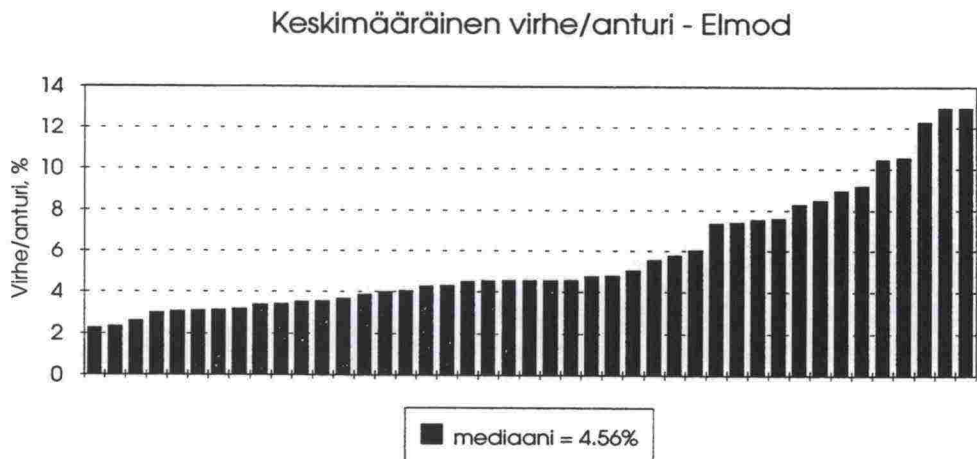
5.2 Mitattujen ja laskettujen taipumien virhetarkastelu

Takaisinlaskentatulosten luotettavuutta voidaan arvioida mitattujen ja laskettujen taipumien välisen eron perusteella. SHRP:n takaisinlaskentaohjeiden /6/ mukaan Modulus-laskelmissa keskimääräinen virhe kunkin anturin kohdalla saa olla enintään 2%. Modulus-ohjelmassa virhe ilmoitetaan 0,01% tarkkuudella, kun Elmod-ohjelmassa se ilmoitetaan 1% tarkkuudella.

Kaikkien mittauspisteiden (42 kpl) keskimääräinen virhe kunkin anturin kohdalla laskettiin molemmille ohjelmille. Virhejakauma on esitetty kuvassa 8 Modulus-ohjelmalle ja kuvassa 9 Elmod-ohjelmalle.



Kuva 8: SHRP-LTPP tutkimus. Keskimääräinen virhe/anturi. Modulus-takaisinlaskentaohjelma.



Kuva 9: SHRP-LTPP tutkimus. Keskimääräinen virhe/anturi. Elmod-takaisinlaskentaohjelma.

Nähdään, että Modulus-laskelmissa virhe on <2% muutamaa kohdetta lukuunottamatta ja että virhe Elmod-laskelmissa on yleensä huomattavasti suurempi. Molemmilla ohjelmilla suurimmat virheet saadaan kohteissa, joissa asfaltin moduulille on jouduttu antamaan kiinteä arvo. Tällöin ohjelma pakotetaan muuttamaan muita kerrosmoduuleja virheen minimoimiseksi, ja teoreettisesti "oikeata" ratkaisua ei saavuteta vaan virhe kasvaa suureksi.

Kaikkien kohteiden virheen keskiarvo on Modulus-laskelmissa 1,82% ja Elmod-laskelmissa 5,68%. Muutama suuri arvo suurentaa keskiarvoa, joten jakauman kuvaamiseen käytetään usein mediaania. Modulus-laskelmissa virheen mediaani on 0,74% ja Elmod-laskelmissa 4,56%. Nähdään, että virhe Elmod-laskelmissa on noin viisinkertainen Modulus-laskelmiin verrattuna. Pienin arvo virheelle Elmodissa on 2,26%, mikä on edelleen suurempi kuin SHRP:n takaisinlaskentaohjeissa /6/ asetettu 2% raja. On kyseenalaista, pitäisikö tätä kriteeriä edes soveltaa Elmod-ohjelmaan, joka käyttää aivan eri laskentamenetelmää kuin Modulus. Kuten aluksi todettiin, myös tarkkuuden kertaluokka, jolla virhe ilmoitetaan, on erilainen.

Yhteenvetona voidaan todeta, että Modulus-ohjelmalla etsitään teoreettisesti oikeata ratkaisua, jolla mitattujen ja laskettujen taipumien välinen ero saadaan minimoitua. Tuloksena saatavat kerrosmoduulien arvot saattavat tietyissä tapauksissa olla epärealistisen korkeita. Elmod-ohjelmalla ei saada yksittäisiä korkeita moduuliarvoja, mutta sitomattomien kerrosten ja pohjamaan moduulit ovat yleensä korkeampia kuin Modulus-ohjelmalla lasketut moduulit. Myös virhe lasketuissa taipumissa on suuri.

Luvussa 7 tullaan näkemään, että erot eri laskentamenetelmillä lasketuissa venymissä ovat melko pieniä. Tämä johtuu siitä, että vaikka erot moduulilaskelmissa ovat paikoin suuria, Elmod-ohjelmassa esiintyvä likimääräismenetelmän käytön aiheuttama systemaattinen virhe korjautuu, koska vastinpaksuusmenetelmää käytetään molempiin suuntiin, sekä moduulien takaisinlaskennassa että muodonmuutosten eteenpäinlaskennassa.

5.3 Takaisinlaskettujen kerrosmoduulien hajonta

Takaisinlaskettujen kerrosmoduulien variaatiokerroin (CV) kuvaa kerroksen materiaaliominaisuuksien hajontaa. Se määritellään kullekin koeosuudelle 42 mittauspisteen otoskeskihajonnan σ ja keskiarvon \bar{x} osamääränä:

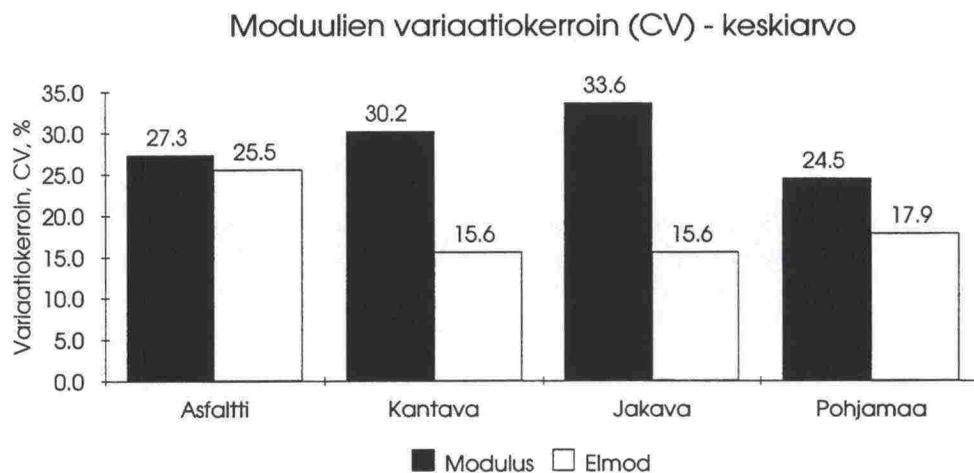
$$CV = \frac{\sigma}{x} \quad (10)$$

Koeteiden variaatiokertoimen keskiarvo ja mediaani on esitetty kuvissa 10 ja 11. On huomautettava, että tässä ei ole tarkasteltu variaatiokerrointa eri ohjelmien tuloksissa kohteittain, vaan 43 koetien keskimääräistä variaatiokerrointa. Takaisinlasketuille asfaltin ja pohjamaan moduuleille saadaan yleensä jotakuinkin saman suuruinen variaatiokerroin molemmilla ohjelmilla.

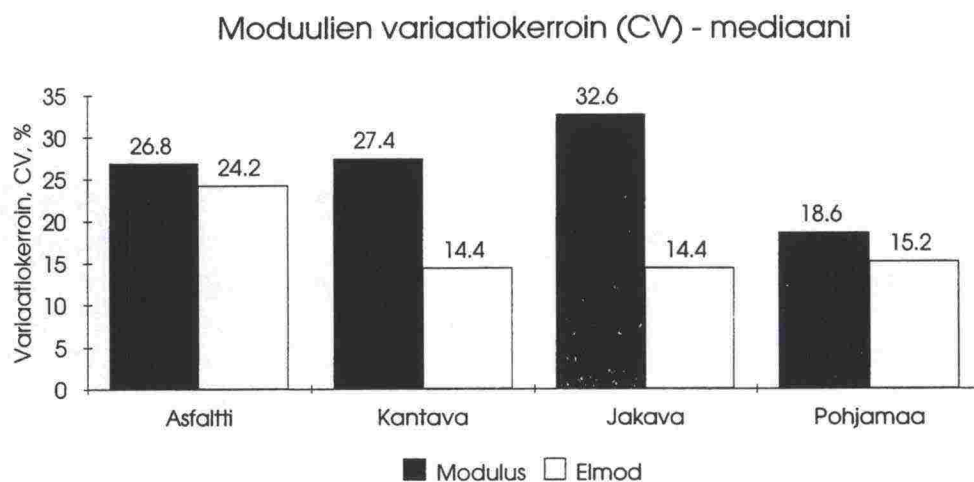
Kantavan ja jakavan kerroksen moduuliarvolle saadaan Modulus-ohjelmalla yleensä noin kaksinkertainen variaatiokertoimen arvo Elmodin tuloksiin verrattuna. Tästä voi päätellä, että edellä kuvattuun tapaan Modulus-ohjelmassa etsitään teoreettisesti oikeata ratkaisua jolla mitatut ja lasketut taipumat saadaan vastaamaan toisiaan mahdollisimman tarkasti. Tällöin kussakin mittauspisteessä saadaan oma kerrosmoduulien yhdistelmä, mikä johtaa suurehkoon kohteen sisäiseen variaatiokertoimen arvoon.

Kantavan ja jakavan kerroksen moduulin variaatiokerroin on Elmodissa yhtä suuri. Tämä aiheutuu siitä, että niiden osamäärä on kaavan (9) mukaan sama kaikissa mittauspisteissä. Tällöin niiden hajonta on luonnollisesti yhtä suuri.

Yleisesti hyväksytyn käsityksen mukaan takaisinlasketut asfaltin ja pohjamaan moduulit ovat luotettavampia kuin sitomattomien kerrosten takaisinlasketut moduulit. Tämän tutkimuksen perusteella sitomattomille kerroksille laskettuja muodonmuutosmoduulien arvoja tulee tarkastella kriittisesti.



Kuva 10: SHRP-LTPP tutkimus. Rakennekerrosmoduulien keskimääräinen variaatiokerroin (CV).



Kuva 11: SHRP-LTPP tutkimus. Kerrosmoduulien variaatiokertoimen (CV) mediaani.

6 RAKENNEKERROSMATERIAALIEN JÄNNITYS- RIIPPUVUUS

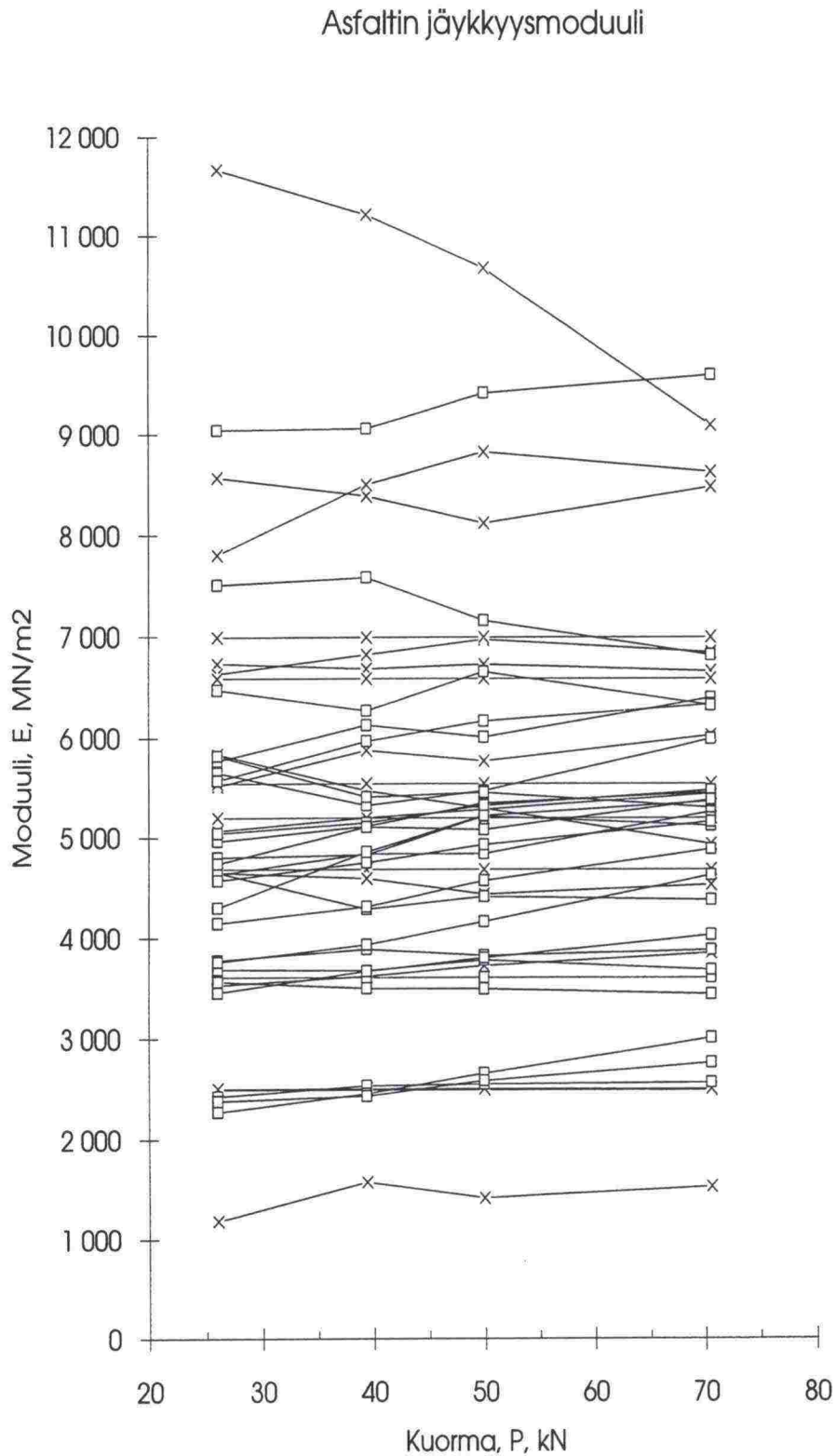
Pudotuspainomittaukset tehtiin neljällä eri pudotuskorkeudella rakennekerros-
materiaalien jännitysriippuvuuden selvittämiseksi. Kerrosmoduulit kullakin
kuormitustasolla laskettiin nelikerrosrakenteelle Modulus- ja Elmod-takaisin-
laskentaohjelmilla edellisessä luvussa kuvatulla tavalla. Modulus-ohjelmaan
syötettäviä rajoja kerrosmoduulien arvoille on tarvittaessa muutettu eri
pudotuskorkeuksilla.

Kerrosmoduulit jännitystason funktiona on esitetty kuvissa 12-15 Modulus-
laskelmien tuloksista ja kuvissa 16-19 Elmod-laskelmien tuloksista. Kuvissa
12 ja 16 esitetyt asfaltin moduuliarvot ovat +21 °C vertailulämpötilaan lähteen
/7/ mukaan korjattuja arvoja. Kuvista havaitaan selvästi, että jännitystason
vaikutus kantavan kerroksen moduuliin on suurin. Jotkin sitomattomien
kerrosten moduuliarvot vaikuttavat epärealistisen korkeilta tutkituille materiaa-
leille. Mahdollisia syitä tähän on pohdittu edellisessä luvussa vertailtaessa
ohjelmien antamia tuloksia keskenään.

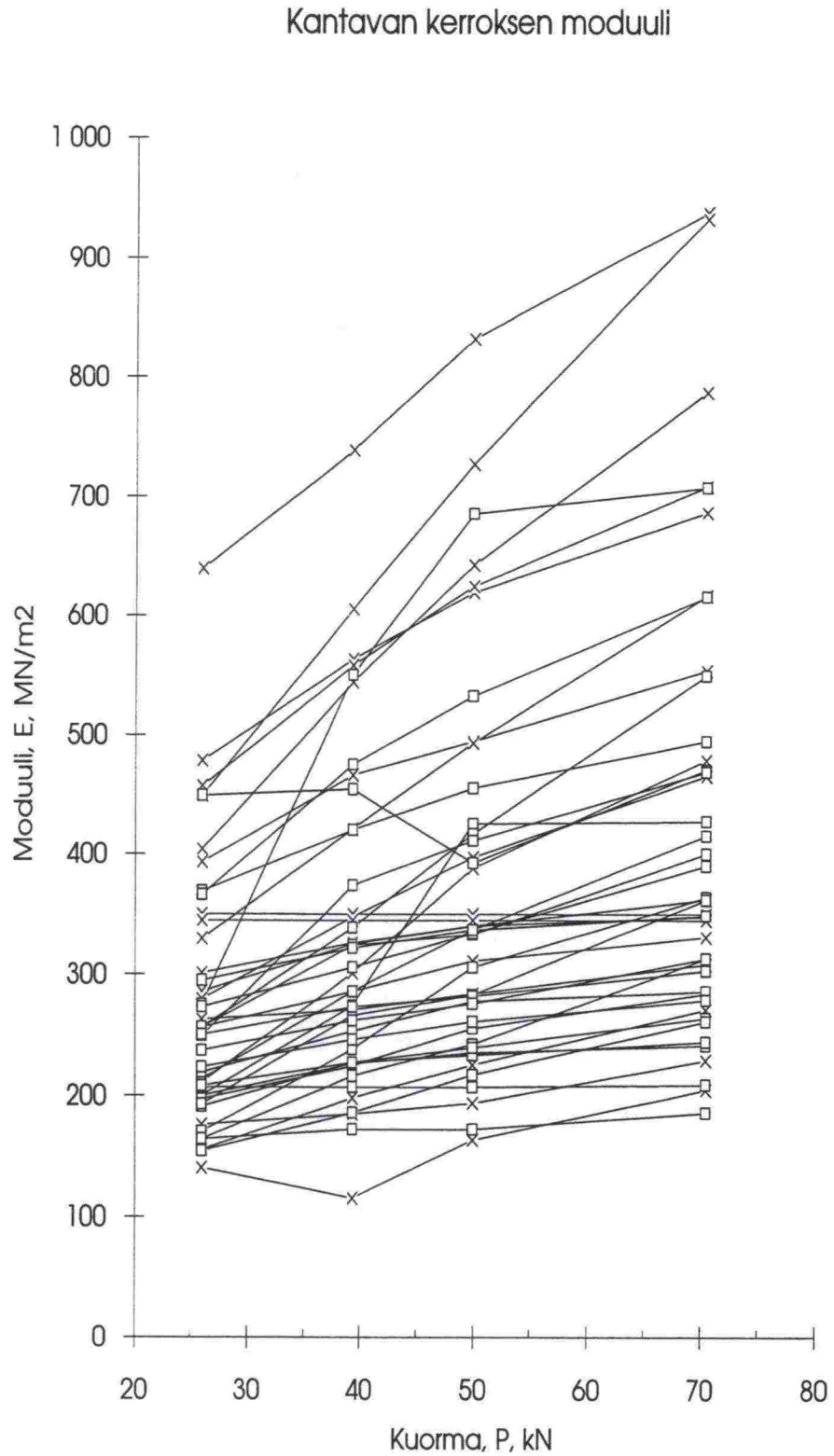
Molemmilla ohjelmilla lasketut asfaltin moduulit osoittavat jännitysriippuvuutta.
Elmod-laskelmissa se on suurempaa kuin Modulus-laskelmissa. Keskimääräi-
nen moduulin kasvu alimman ja ylimmän kuormitustason välillä on Elmodissa
23% ja Moduluksessa 12% verrattuna moduuliin alimmalla kuormitustasolla.
Kahta koeosuutta lukuunottamatta asfaltin moduuli kasvaa Elmod-laskelmissa.
Modulus-laskelmissa havaitaan sekä moduulin nousua että laskua
kuormitustason noustessa (kuvat 12 ja 16).

Parker /12/ havaitsi saman ilmiön tutkiessaan materiaalien jännitysriippuvuutta
pudotuspainolaitemittausten perusteella. Kerrosmoduulien takaisinlaskentaan
käytettiin Elmod-ohjelmaa. Yhteyttä laboratorioissa määritettyjen ja kenttämit-
tauksista laskettujen materiaalimoduulien välille ei löydetty. Muut tekijät kuin
jännitystaso, kuten lineaaris-elastinen materiaalmalli ja edellisessä luvussa
kuvattu dynaamisen kuormituksen käsittely analyysissä staattisena voivat olla
näennäisen jännitysriippuvuuden syynä. Tämä ei välttämättä osoita, että
asfaltti käyttäytyisi epälineaarisesti. Toisaalta asfaltti on epälineaarisesti
käyttäytyvän kiviaineksen ja bitumin yhdistelmä.

Sitomattomissa rakennekerroksissa käytetään kitkamaalajeja, joiden moduuli
kasvaa jännitystason noustessa. Pohjamaassa esiintyy sekä kitka- että
koheesiomaalajeja. Jälkimmäisten moduulin tulisi pienentyä jännitystason
kasvaessa leikkausjännityksen vaikutuksesta /11/. Kuvien 13 ja 17 perusteella
jännitysriippuvuus on suurinta kantavassa kerroksessa. Pohjamailla havaitaan
vähäistä jännitysriippuvuutta. Tämä johtuu eri kerroksiin aiheutuvasta erilai-

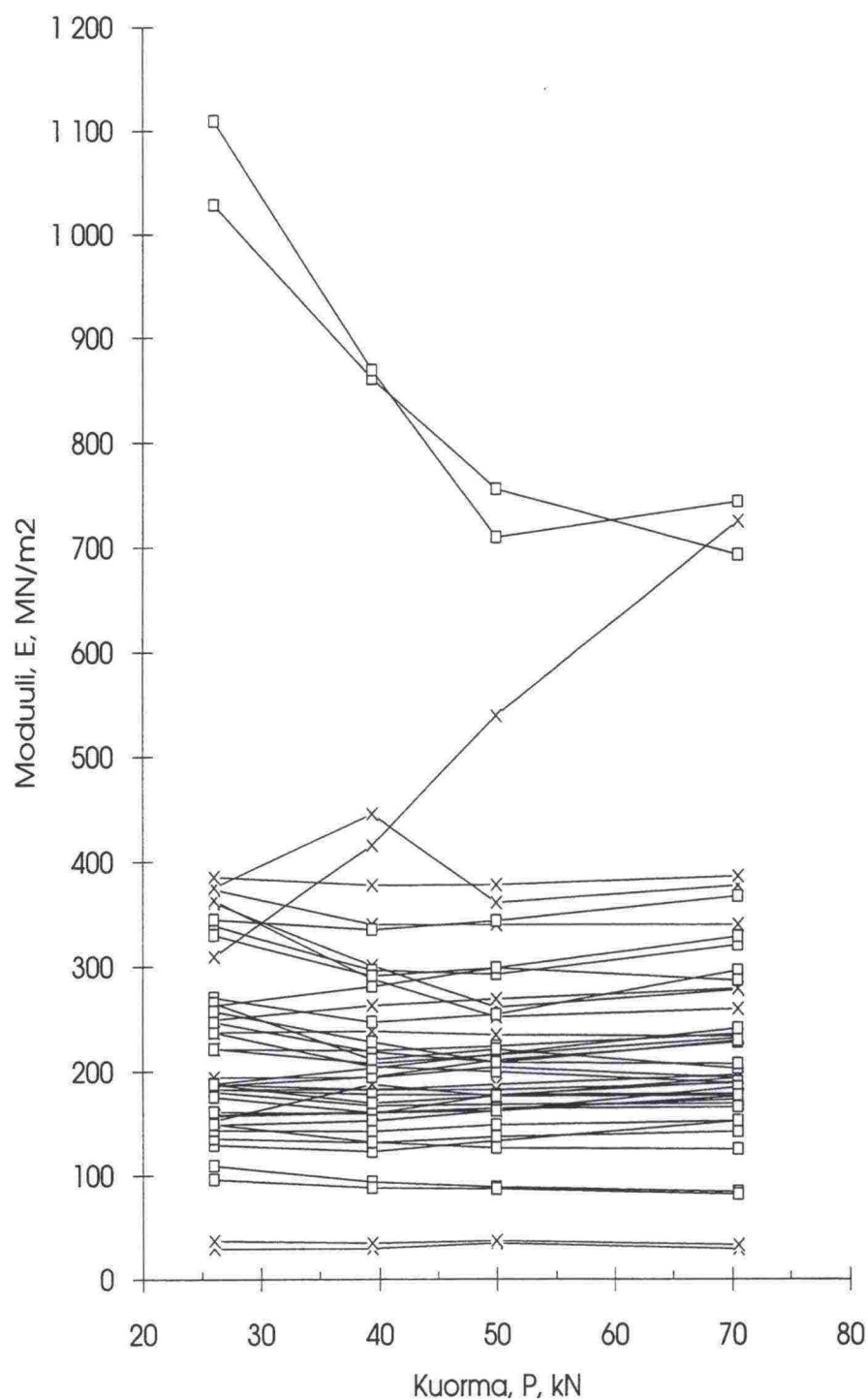


Kuva 12: SHRP-LTPP tutkimus. Takaisinlasketun asfaltin moduulin jännitysriippuvuus. Modulus-ohjelma.

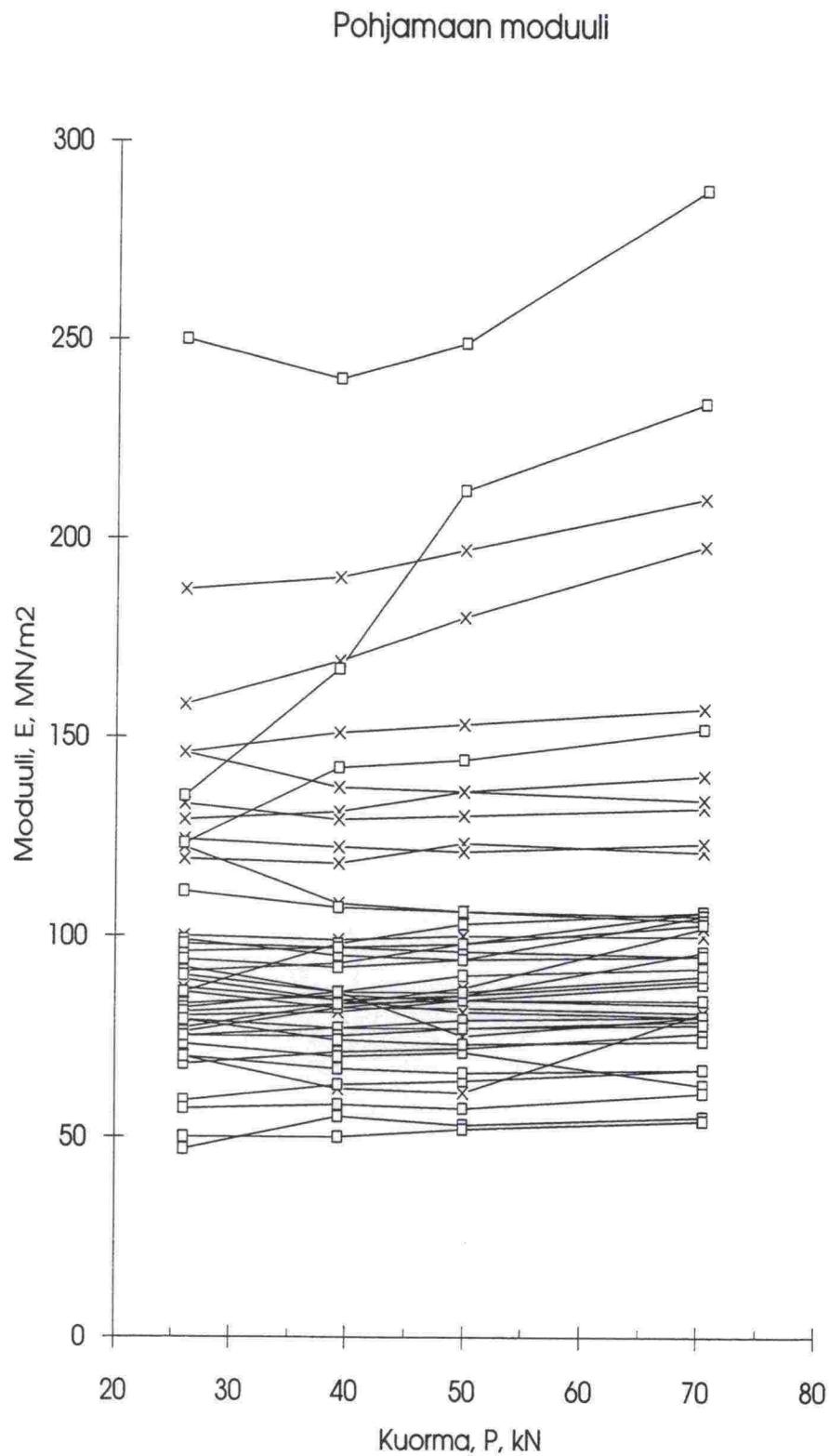


Kuva 13: SHRP-LTPP tutkimus. Takaisinlasketun kantavan kerroksen moduulin jännitysriippuvuus. Modulus-ohjelma.

Jakavan kerroksen moduuli

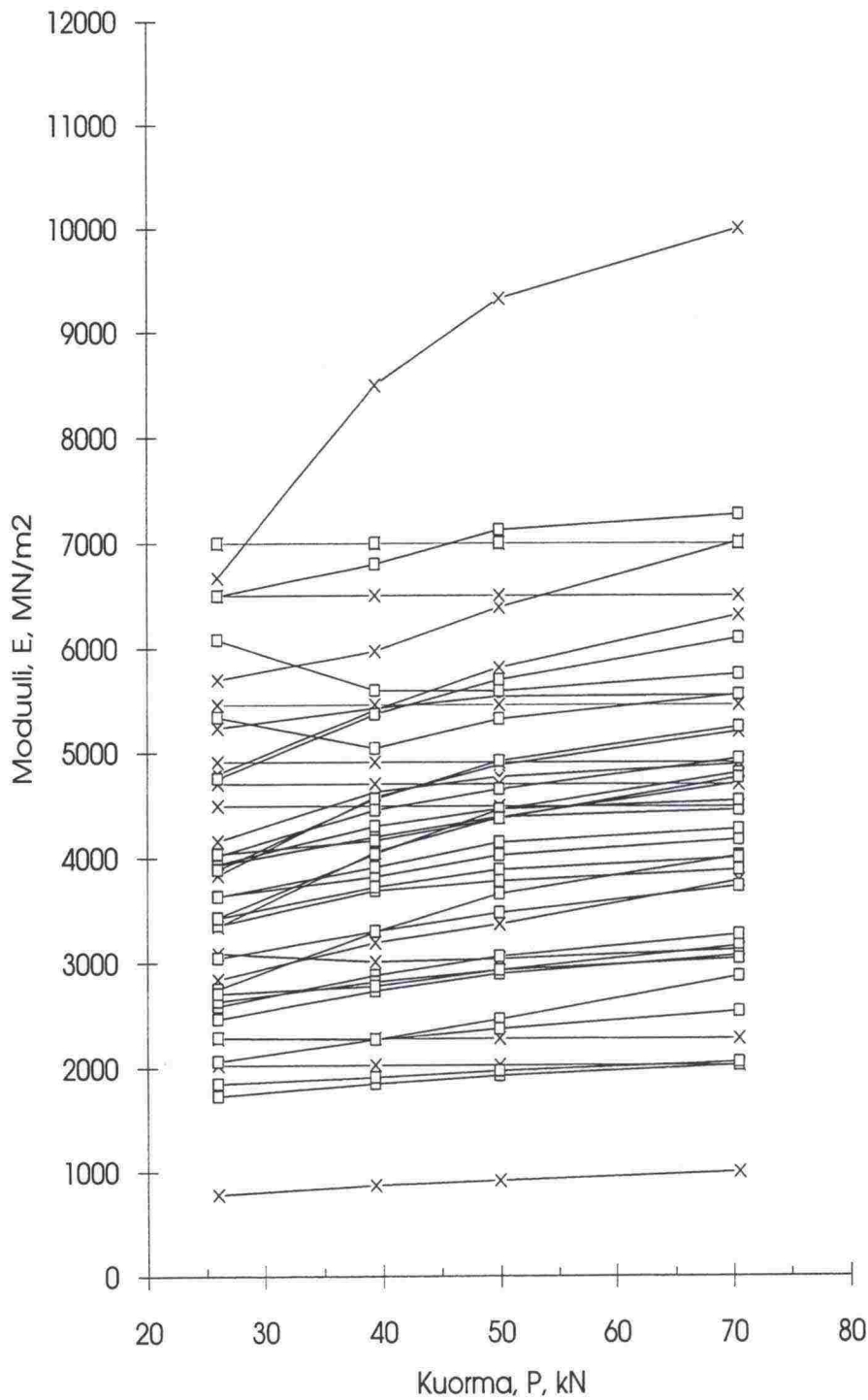


Kuva 14: SHRP-LTPP tutkimus. Takaisinlasketun jakavan kerroksen moduulin jännitysriippuvuus. Modulus-ohjelma.



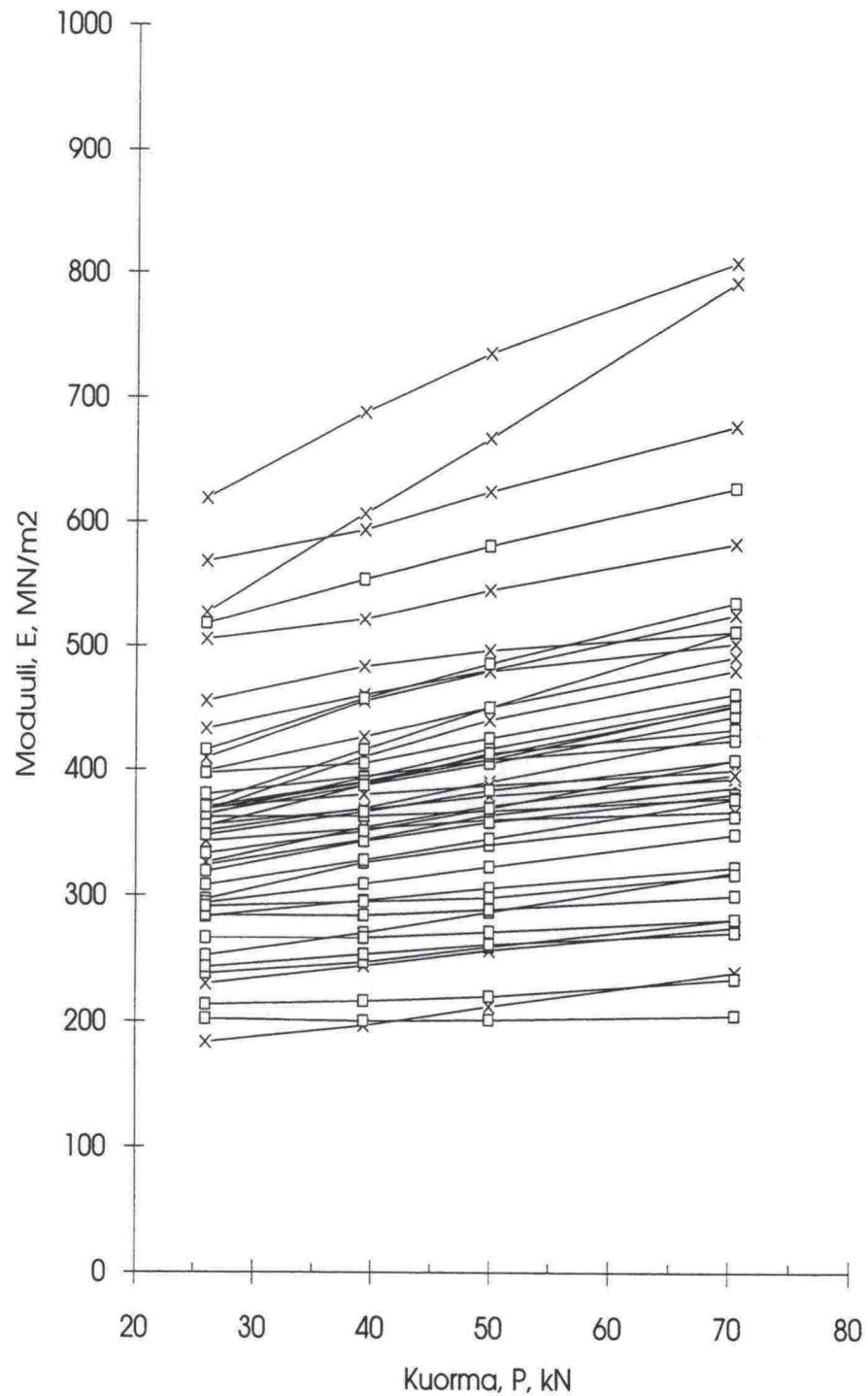
Kuva 15: SHRP-LTPP tutkimus. Takaisinlasketun pohjamaan moduulin jännitysriippuvuus. Modulus-ohjelma.

Asfaltin jäykkäysmoduuli

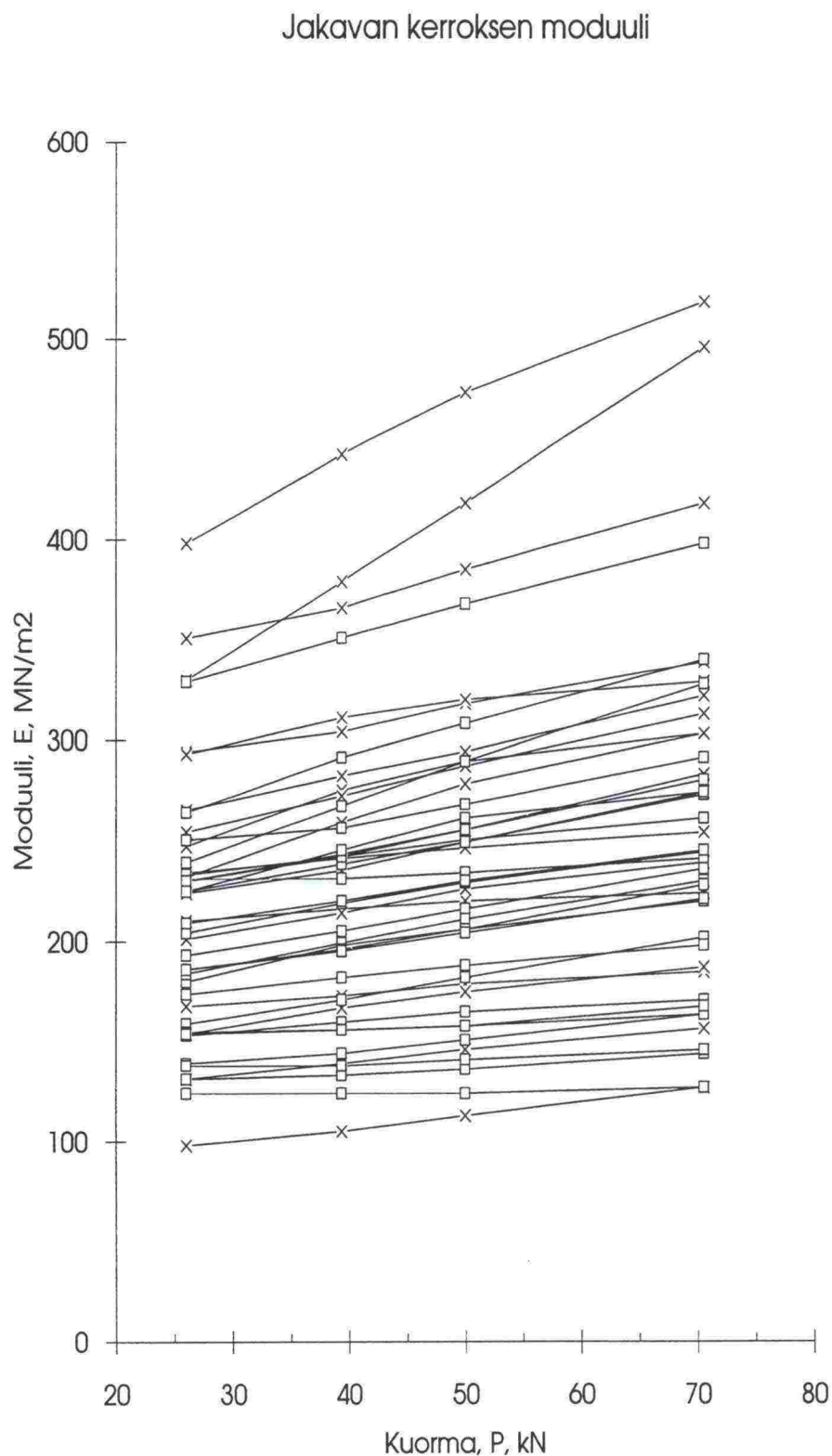


Kuva 16: SHRP-LTPP tutkimus. Takaisinlasketun asfaltin moduulin jännitysriippuvuus. Elmod-ohjelma.

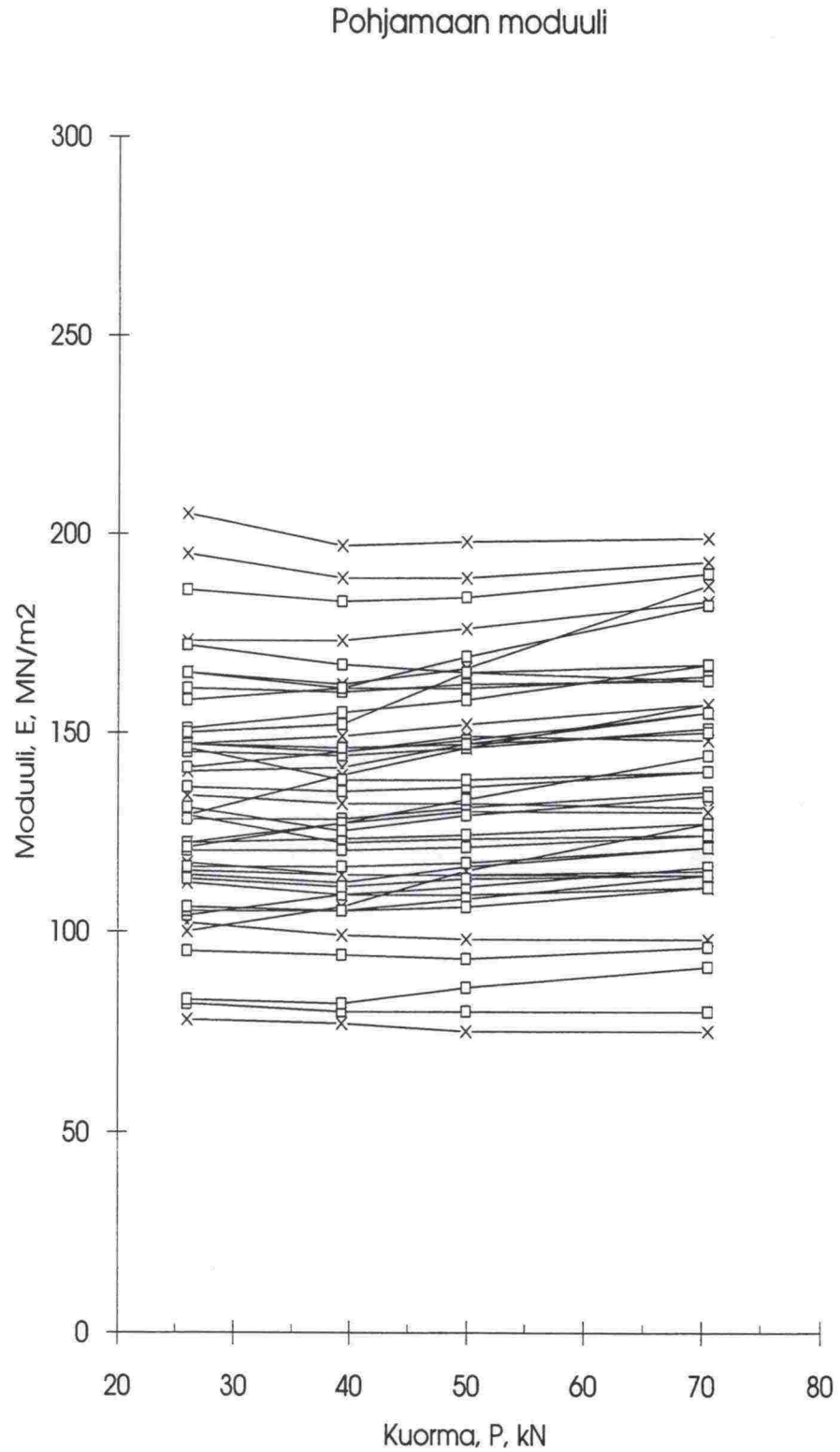
Kantavan kerroksen moduuli



Kuva 17: SHRP-LTPP tutkimus. Takaisinlasketun kantavan kerroksen moduulin jännitysriippuvuus. Elmod-ohjelma.



Kuva 18: SHRP-LTPP tutkimus. Takaisinlasketun jakavan kerroksen moduulin jännitysriippuvuus. Elmod-ohjelma.



Kuva 19: SHRP-LTPP tutkimus. Takaisinlasketun pohjamaan moduulin jännitysriippuvuus. Elmod-ohjelma.

sesta jännitystasosta. Asfalttipäällyste ja sitomaton kantava kerros ottavat vastaan suurimman osan liikenne- ja pudotuspainolaitteen kuormituksesta. Suomalaiset tierakenteet ovat routamitoituksen takia yleensä paksuja, jolloin pohjamaahan kohdistuva jännitys on suhteellisen pieni.

Liikennekuorman eri rakennekerroksiin aiheuttamaa jännitystasoa tutkittiin laskemalla teoreettiset jännitykset lineaaris-elastisella monikerrosohjelmalla (BISAR). Lähtöarvoina käytettiin kullekin kuormitustasolle keskimääräisiä kerrospaksuuksia ja moduuleita. Asfaltin moduuli vaihteli jännitystasosta riippuen välillä 5270-5420 MN/m² ja kantavan kerroksen moduuli välillä 290-470 MN/m². Jakavan kerroksen ja pohjamaan moduuli pidettiin vakiona, 250 MN/m² ja 100 MN/m², koska niiden vaihtelu oli jännitysten laskennan kannalta vähämerkityksistä. Asfalttikerroksen paksuus oli 100 mm, kantavan kerroksen paksuus 200 mm ja jakavan kerroksen paksuus 750 mm. Pyöräkuormana käytettiin mittauksissa käytettyjä eri pudotuskorkeuksia vastaavia tavoitekuormia 27, 40, 50 ja 71 kN. Vastaavat paripyörän kosketuspaineet olivat 380, 560, 700 ja 1000 kPa.

Pohjamaan yläpinnan pystysuora puristusjännitys vaihteli välillä 9-16 kPa alimman ja ylimmän kuormitustason välillä. Pystysuora puristusjännitys jakavan kerroksen puolivälissä vaihteli välillä 15-38 kPa ja kantavan kerroksen puolivälissä vastaavasti välillä 60-167 kPa. Nähdään, että jännitystaso on korkeampi kantavassa kerroksessa kuin jakavassa kerroksessa ja pohjamaassa ja että jännitystason kasvu kuormitustason kasvaessa on myös suurempaa. Voidaan päätellä, että liikennekuormitus vaikuttaa eniten kantavan kerroksen moduuliin.

Kolisoja /13/ on tutkinut kantavassa kerroksessa käytettävien murskeiden ja luonnonsoran muodonmuutosominaisuuksia laboratoriossa dynaamisella kolmiakselilaitteistolla. Pääjännitysten summa vaihteli laboratoriokokeissa 100-700 kPa välillä. Muodonmuutosmoduuli kasvoi jännitystason noustessa ja vaihteli vastaavasti välillä 150-800 MN/m².

Jotta takaisinlaskettuja kerrosmoduulien arvoja voi verrata laboratoriossa määritettyihin moduuleihin, on tunnettava tierakenteessa mittaushetkellä vallinnut jännitystaso. Sen määrittäminen on kuitenkin vaikeaa, koska vaakasuorien jännitysten määrittäminen luotettavasti tuottaa ongelmia. Kuormituksesta aiheutuva pystyjännitys laskettiin Bisar-ohjelmalla edellisissä kappaleissa esitetyllä tavalla ja se vaihteli kantavan kerroksen keskellä välillä 60-170 kPa. Vaakasuuntaisiin jännityksiin vaikuttavat kuormituksen lisäksi mm. tierakenteessa vallitsevat tiivistystyön aiheuttamat jäännösjännitykset ja lepopaineeroin. Pääjännitysten summa kantavassa kerroksessa voi eri tekijöistä riippuen vaihdella tutkituissa kohteissa välillä 60-500 kPa.

Kolisojan /14/ mukaan sitomattomassa kantavassa kerroksessa liikennekuormituksesta aiheutuva pääjännitysten summa vaihtelee välillä 140-280 kN/m² ja on jakavassa kerroksessa noin 70 kN/m². Laboratoriotutkimuksissa /13/ murskeen ja soran moduuli vaihteli vastaavasti välillä 150-500 MN/m². Kantavan kerroksen molemmilla ohjelmilla takaisinlaskettu kerrosmoduuli vaihteli pääsääntöisesti välillä 150-500 MN/m². Laboratoriokokeita SHRP-LTPP-kohteista otetuille näytteille ei ole vielä tehty, mutta takaisinlasketut moduulit näyttävät vastaavan hyvin vastaaville materiaaleille tehtyjä kolmiaksaalikokeiden tuloksia.

Eroja tuloksiin aiheuttavat mm. rakenteissa mittaushetkellä vallinnut erilainen kosteus-tila. Kosteusvaihteluiden vaikutus on erilainen eri materiaaleilla. Yleisesti ottaen sitomattomien kerrosten moduuli laskee kyllästysasteen kasvaessa /13/.

Kuormitus-aika ei periaatteessa vaikuta sitomattomissa kerroksissa käytettyjen karkearakeisten materiaalien moduuliin, koska vesi pääsee liikkumaan huokostilassa. On kuitenkin mahdollista, että kuormitusajan vaikutus lisääntyy kyllästysasteen kasvaessa. Laboratoriokokeissa /13/ kuormitus-aika oli pidempi (100 ms) kuin pudotuspainomittauksissa (30 ms), jolloin on oletettavaa, että laboratoriossa määritetyt moduulit voivat olla pienempiä kuin takaisinlasketut moduulit.

Jännitystason vaikutus rakennekerrosmoduuleihin on lähteen /12/ mukaan pienempi kuin vuodenaikojen vaihtelun vaikutus. Se tulee kuitenkin ottaa huomioon määritettäessä keskimääräisiä materiaalimoduuleja.

Elmod-ohjelmalla takaisinlasketut kantavan ja jakavan kerroksen moduulit kasvavat jännitystason kasvaessa kaikilla koeosuuksilla. Tämä sopii yhteen koekuopista otetuille näytteille tehtyjen seulontatulosten kanssa, joiden mukaan sitomattomissa kerroksissa on käytetty kitkamaalajeja, joiden moduulin tulisikin kasvaa jännitystason kasvaessa. Modulus-ohjelmalla lasketut jakavan kerroksen moduulit laskevat jännitystason noustessa joissain tapauksissa, mikä vaikuttaa epätavalliselta. Tämä voi johtua esimerkiksi siitä, että jakavaan kerrokseen on laskennassa yhdistetty joissakin tapauksissa rakeisuudeltaan keskenään hyvinkin erilaisia kerroksia.

Koekuopan pohjalta noin 1-1,5 metrin syvyydestä otettiin näyte pohjamaasta. Maalajiluokitus tehtiin näytteestä tehdyn seulonnan perusteella /15/. Maalajeista 31 luokiteltiin kitkamaaksi ja 12 koheesiomaaksi. On huomattava, että monessa tapauksessa näyte on pengertäytteestä, jonka paksuus voi olla useita metrejä ja joka on yleensä moreenia tai muuta kitkamaata, vaikka alla oleva pohjamaa olisikin koheesiomaata. Pudotuspainolaitemittauksissa

kauimmainen anturi sijaitsi 1,5 metrin etäisyydellä kuormituslevystä, joten takaisinlaskettu pohjamaan moduuli kuvaa pohjamaan ominaisuuksia syvyydellä, jolta pohjamaan näyte on otettu.

Takaisinlaskettuja pohjamaan moduuliarvoja eri kuormitustasoilla verrattiin maalajiluokituksen tuloksiin. Havaittiin, että molemmilla ohjelmilla laskettu pohjamaan moduuli kasvoi jännitystason kasvaessa kitkamaalajeilla yli kahdessa kolmasosasta tapauksista. Molemmilla ohjelmilla lasketuissa pohjamaan moduuleissa havaittiin useimmissa tapauksissa myös koheesiomailla kasvua jännitystason kasvaessa. Jännitystason vaikutus takaisinlaskettuun pohjamaan moduuliin näyttäisi olevan epäselvä. On huomattava kuitenkin, että pohjamaan jännitysriippuvuus on myös pienempää kuin sitomattomien rakennekerrosten jännitysriippuvuus. Kuten edellä todettiin, tämä aiheutuu siitä, että liikenteen kuormitusvaikutus pohjamaahan on pieni verrattuna tien rakennekerrosten vastaanottamaan kuormitukseen.

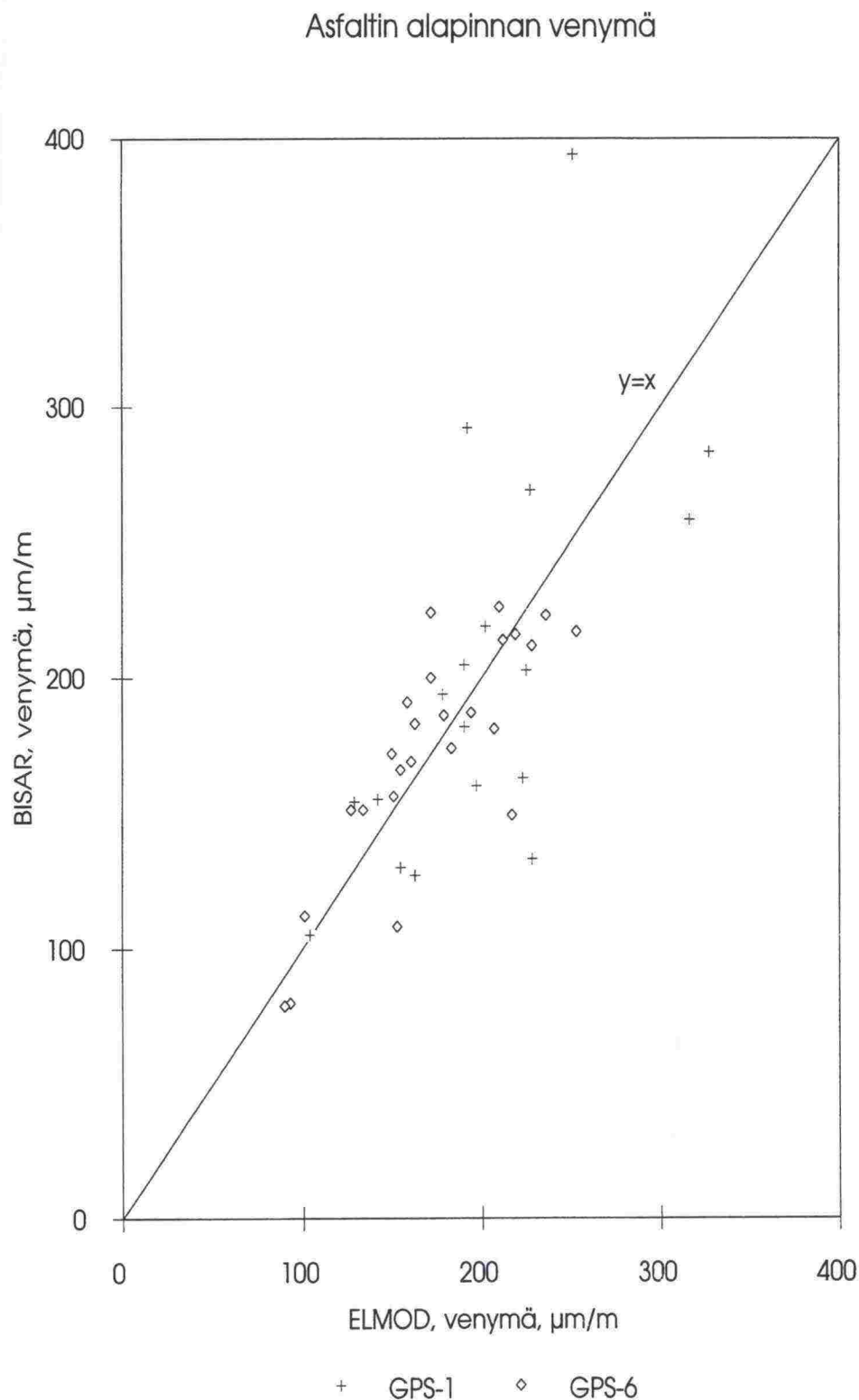
7 KRIITTISTEN MUODONMUUTOSTEN LASKEMINEN ERI MENETELMILLÄ

Eri takaisinlaskentaohjelmilla saadaan joissakin tapauksissa hyvinkin erilaisia kerrosmoduulien arvoja, kuten kahdesta edellisestä luvusta havaitaan. Usein pudotuspainomittausten tuloksia käytetään edelleen kriittisten muodonmuutosten laskemiseen määriteltäessä jonkin tien uudelleenpäälylystystarvetta tai mekanistis-empiirisiä mitoitusmenetelmiä kehitettäessä. Kriittisinä muodonmuutoksina käsitellään yleensä asfaltin alapinnan pitkittäistä vetomuodonmuutosta ja pohjamaan yläpinnan pystysuoraa puristumaa.

Kriittiset muodonmuutokset laskettiin lineaaris-elastisella monikerrosohjelmalla (BISAR) käyttäen lähtöarvoina Modulus-laskelmista saatuja rakennekerrosmoduuleja ja samoja kerrospaksuuksia. Näitä verrattiin Elmod-ohjelmalla laskettuihin kriittisiin muodonmuutoksiin. Elmod laskee kriittiset muodonmuutokset Boussinesqin yhtälöillä käyttäen hyväksi Odemarkin vastinpaksuusmenetelmää (MET). Vertailun tulokset on esitetty kuvissa 20 ja 21.

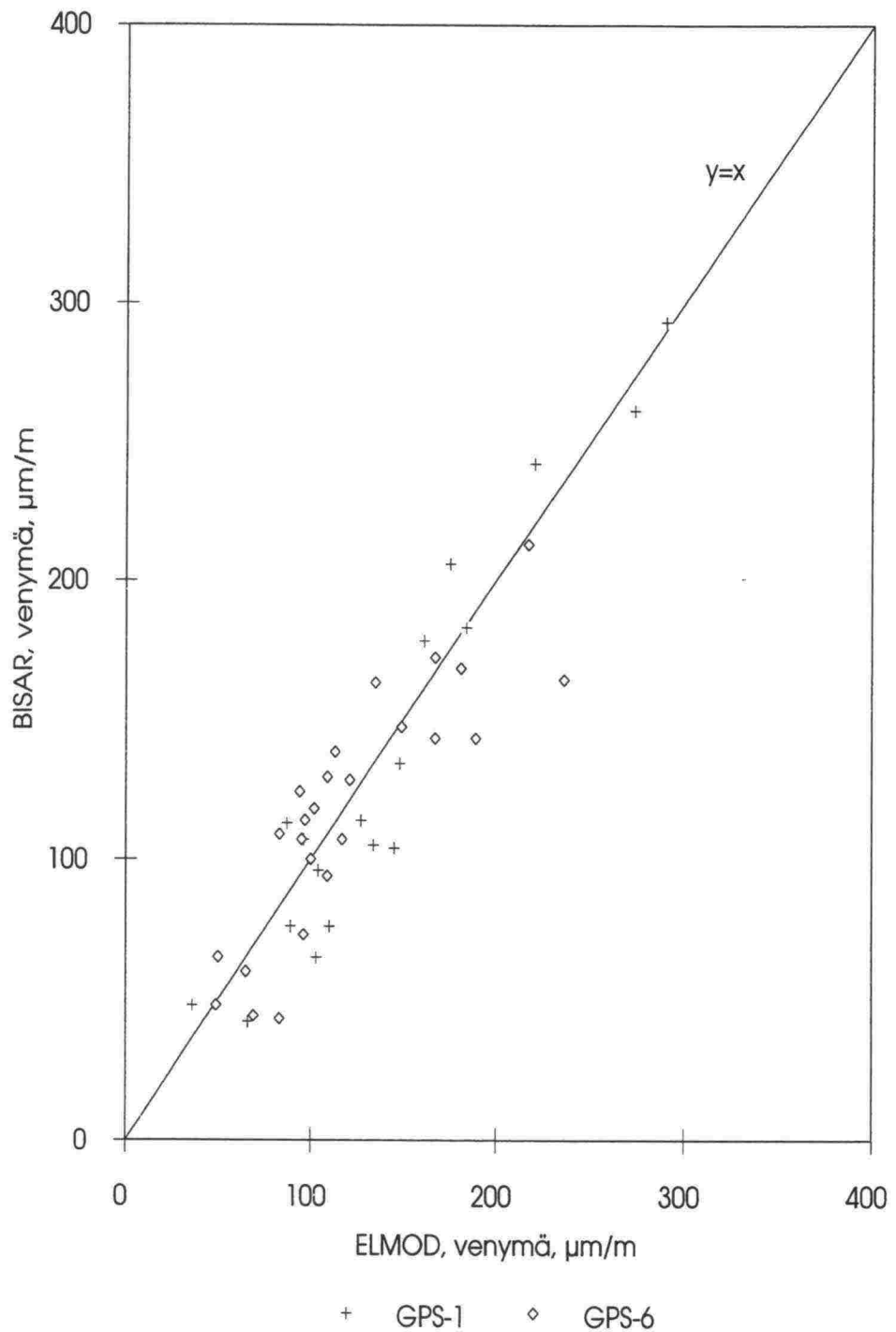
Nähdään, että molemmilla menetelmillä lasketut muodonmuutokset ovat hyvin lähellä toisiaan useimmissa tapauksissa, erityisesti pohjamaan puristuman osalta. Kuvassa 20 havaitaan joitakin hajontapisteitä asfaltin venymälle. Nämä ovat samoja kohteita, joissa ero mitattujen ja laskettujen taipumien välillä on takaisinlaskennoissa suuri, joten niille ei tarvitse antaa tässä vertailussa kovin suurta merkitystä.

Virhe Elmod-ohjelmalla takaisinlasketuissa kerrosmoduuleissa kompensoituu venymien eteenpäinlaskennassa, koska Odemarkin vastinpaksuusmenetelmää käytetään molempiin suuntiin /2/. Jos halutaan laskea vain venymät eikä materiaalimoduuleja tarvita, sekä Modulus- että Elmod-ohjelmilla saadaan samantapaisia tuloksia. Mutta jos tarvitaan rakennekerrosten materiaalimoduuleja, laskentaohjelman valinta vaikuttaa tuloksiin merkittävästi. Analyttisiä mitoitusmenetelmiä käytettäessä tarvitaan yleensä sekä materiaalimoduuleja että kriittisiä muodonmuutoksia.



Kuva 20: SHRP-LTPP tutkimus. Eri menetelmillä laskettu asfaltin alapinnan vetomuodonmuutos.

Pohjamaan yläpinnan puristuma



Kuva 21: SHRP-LTPP tutkimus. Eri menetelmillä laskettu pohjamaan yläpinnan pystysuora puristuma.

8 VAURIOITUMISEN MALLINTAMINEN

8.1 Mallintamisen lähtökohdat

Tien vaurioitumiselle on tyypillistä, että lyhyelläkin tieosuudella halkeamat syntyvät eri aikoina useissa paikoissa. Tämä johtuu materiaalien ominaisuuksien, kerrospaksuuksien ja pohjamaan ominaisuuksien vaihteluista. Yhdessä eri kuormitustekijöiden (liikenne, ilmasto) kanssa tämä johtaa monimutkaiseen päällystesyhteeseen, jossa halkeamien syntyminen on luonteeltaan satunnaisista.

Kun päällysteen pintaan on ilmaantunut halkeama, käyttäytyy tierakenne toisin kuin ennen vaurioitumista. Tähän on syynä halkeamisesta johtuvat päällysteen epäjatkuvuuskohdat, jolloin sidotut kerrokset eivät toimi samalla tavalla kuormitusta jakavana laattana kuin päällysteen ollessa ehjä. Mallintaminen onkin tästä syystä jaettu kahteen osaan seuraavasti:

1. Tien rakentamisajankohdan ja ensimmäisen vaurion ilmaantumisen välisen aikavälin mallintaminen. Tämä tarkoittaa halkeaman syntymistodennäköisyyden mallintamista ajan suhteen.
2. Vaurion etenemisen mallintaminen ehdolla, että vaurioituminen on jo alkanut.

Halkeaman synnyn mallintamiseen voidaan käyttää tavanomaisia eloonjäämisanalyysin menetelmiä. Eloonjäämisanalyysin elinajan käsitettä vastaa aika tien rakentamisesta (tai uudelleenpäällystämistä) ensimmäisen halkeaman ilmaantumiseen. Tämän elinajan mallintaminen on mallintamisen ensimmäinen vaihe. Elinajan päätyttyä tien vaurioituminen jatkuu tien käytön myötä kunnes saavutetaan taso, jolloin on ryhdyttävä korjaustoimenpiteisiin. Korjaustoimenpide päättää mallintamisvaiheen 2. Omaksutun kaltainen kaksivaiheinen mallinnus ratkaisee yksivaiheisena sovellettujen regressiomallien yhteydessä syntyvän nolla-arvojen ongelman.

8.2 Vaurioitumisajankohdan mallintaminen

8.2.1 Mallintamisen periaatteet

Tämän tutkimuksen yhteydessä vaurioituneilla kohteilla tarkoitetaan kohteita, joissa esiintyy sekä liikenne- että ilmastorasituksesta aiheutuvia verkko- tai pituushalkeamia. Vaurioitumisen alkamisen mallintamiseen on tarjolla useita vaihtoehtoja. Tässä tutkimuksessa on sovellettu lineaarista mallia havaittujen elinaikojen logaritmiin:

$$\ln T_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_j x_{ij} + \sigma \varepsilon_i \quad (11)$$

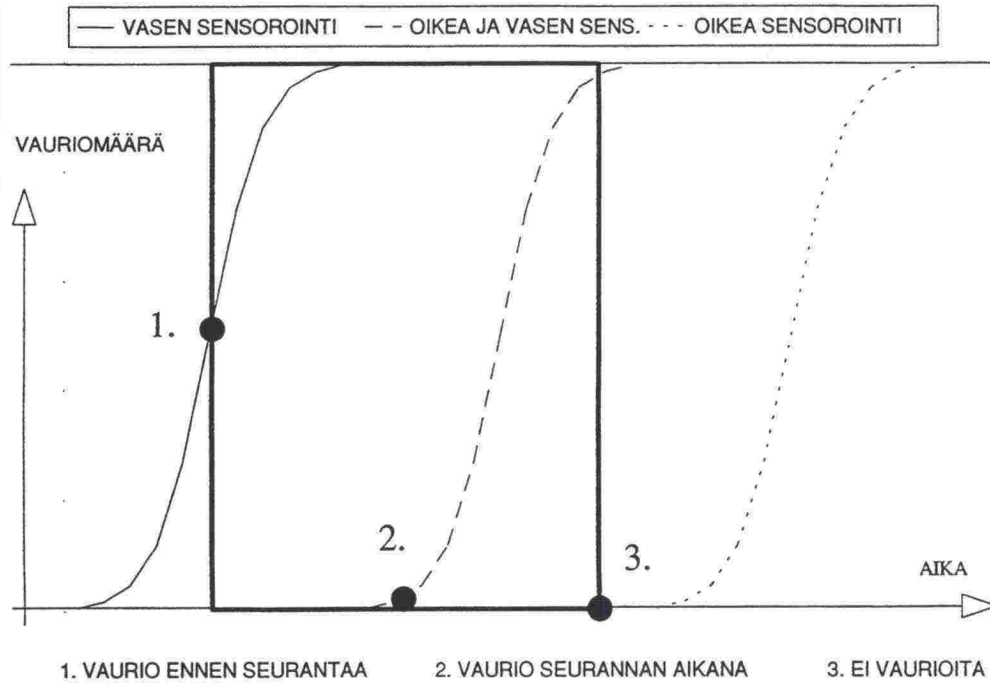
missä T_i on elinikä ensimmäisen vaurion syntyhetkeen
 x_{ij} :t ovat selittävien muuttujien arvoja ja
 β_j :t ovat aineistosta estimoitavia parametreja.

Virhetermien ε_i oletetaan noudattavan jotain tunnettua jakaumaa. Tässä tutkimuksessa käytettiin normaalijakaumaa.

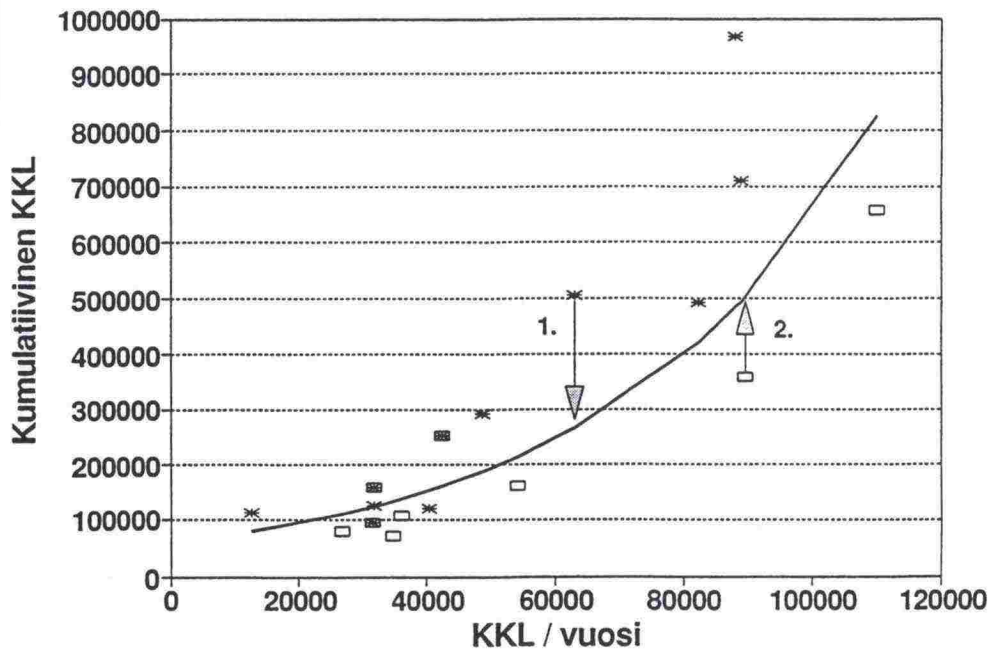
Eloonjäämisanalyysille tyypillinen piirre on, että kaikkia elinaikoja ei tunneta tarkasti. Tätä on havainnointi kuvassa 22, jossa on esitetty havaintoaineiston periaatteellinen kuvaus. Tarkastelujaksoa voidaan kuvata ikkunana, josta vain osa vaurioitumisilmiöstä on nähtävissä (kuvan tummennettu kehikko). Osassa tieosuuskuksia on vaurioita jo tarkastelujakson alussa kun kohde on valittu tutkimukseen mukaan, jolloin ainoastaan eliniän yläraja eli ikä tarkastelujakson alkaessa on tunnettu. Ilmiötä kutsutaan elinajan vasemmaksi sensoroinniksi, jota esittää kuvan kohta numero 1. Osa tieosuuskuksista on vaurioitumattomia tarkastelujakson alussa, eikä vaurioita ole ilmaantunut tarkastelujakson aikanakaan. Tällöin ainoastaan eliniän alaraja eli ikä tarkastelujakson päättyessä on tunnettu. Tätä kutsutaan elinajan oikeaksi sensoroinniksi, jota esittää kuvan kohta numero 3. Joidenkin kohteiden vaurioitumisajankohta tiedetään tarkasti, jota on havainnollistettu kuvan kohdassa numero 2.

Aineistolle, joka on luokiteltu sensoroiduiksi havainnoiksi, voidaan estimointimenetelmänä käyttää maksimi todennäköisyys menetelmää (maximum likelihood method). Tässä tutkimuksessa suoritettavat analyysit on tehty SAS-proseduurin LIFEREG avulla.

Kuvassa 23 on esimerkkitulostus sensoroidusta aineistosta, jossa tien rakentamisvuodesta laskettua kuormituskertalukukertymää selitetään vuosittaisella kuormituskertaluvulla. Mitä suurempi vuosittainen kuormituskertaluku on, sitä paksumpi ja kantavampi tierakenne on (normien mukaan suunniteltu) johtuen pidempään kestoikään. Tähdellä merkityt pisteet tarkoittavat kohteita, jotka olivat vaurioituneita jo ennen seuranta-aikaa (vasen sensorointi), mutta tarkka vaurioitumisajankohta on tuntematon. Neliöllä merkityt pisteet tarkoittavat kohteita, joissa ei ole vaurioita seuranta-aikana (oikea sensorointi). Kuvasta voidaan todeta kolmen kohteen osalta, että tähti sijaitsee neliön sisällä. Näiden kohteiden ensimmäiset vauriot ovat syntyneet seuranta-aikana (vasemman ja oikean sensoroinnin arvo on sama), joiden vaurioitumisajankohta siis tunnetaan. Kuvassa näkyvä käyrä on aineistolle saatu ennustemalli LIFEREG-analyysillä, jota tarkastellaan myöhemmin yksityiskohtaisemmin.



Kuva 22: Tutkimusaineiston periaatteellinen kuvaus eloonjäämisanalyysissä.



Kuva 23: Esimerkki vuosittaisen kuormituskertaluvun vaikutuksesta ensimmäisen vaurion syntymisajankohtaan, jota on kuvattu tien kuormituskertalukukertymällä.

Kuvassa 23 on esitetty kaksi havainnollistavaa nuolta:

1. Vaurioituneen kohteen (tähti) osalta saadaan mallin ennustama ensimmäisen vaurion syntyajankohta siirtämällä piste kohtisuoraan alas käyrälle ja lukemalla sitä vastaava kumulatiivinen kuormituskertaluku.
2. Vaurioitumattoman kohteen (neliö) osalta saadaan mallin ennustama ensimmäisen vaurion syntyajankohta siirtämällä piste kohtisuoraan ylös käyrälle ja lukemalla sitä vastaava kumulatiivinen kuormituskertaluku.

Kuvasta voidaan selvästi havaita, kuinka esimerkkimalli erottaa toisistaan omiksi ryhmikseen ne tiet, joissa on (tähdet) tai ei ole (neliöt) vaurioita. Vaurioitumisen toteutumapisteet (vaurio neliön sisässä) ovat em. ryhmien välissä. Mikäli malli on huono (muuttuja ei selitä vaurioitumista), ei vaurioituneiden ja vaurioitumattomien kohteiden välillä ole havaittavissa selkeää rajaa tai aluetta. Käytännössä mallien tilastolliset tunnusluvut kuvaavat muuttujien merkitystä vaurioitumisen ajankohdan selittämisessä.

8.2.2 Muuttujien valinta

Teiden vaurioitumisajankohtaa ennustavat mallit laadittiin edellä esitetyn kaavan 11 perusteella (SAS-ohjelmiston LIFEREG-proseduuri). Vaurioitumisajankohdaksi (Y-muuttuja) määritettiin se kumulatiivinen kuormituskertaluku, joka tiellä on ollut sen rakentamisvuodesta lähtien siihen hetkeen asti, kun tiellä on esiintynyt ensimmäisen kerran joko verkko- tai pituushalkeama. Vasemmalle sensoroiduissa kohteissa kumulatiivinen kuormituskertaluku on sen vuoden arvo, jolloin kohde tuli seurantaan mukaan. Vastaavasti oikealle sensoroiduissa kohteissa kumulatiivinen kuormituskertaluku on vuoden 1993 arvo. Mikäli kohde on vaurioitunut seurannan aikana, on analyysissä käytetty tähän ajankohtaan kumuloiutunutta kuormituskertojen lukumäärää. Kuormituskertaluvut perustuvat tierekisterissä oleviin arvoihin.

Vaurioitumisen ajankohtaa selittävinä muuttujina tutkittiin seuraavia tekijöitä:

- liikenne:
 - keskimääräinen vuorokausiliikennemäärä
 - vuotuinen kuormituskertaluku
 - raskaan liikenteen määrä (%)

- rakennetiedot:
 - kerrospaksuudet (päällyste, kantava, jakava, suodatin)
 - moduulit (päällyste, kantava, jakava, suodatin, pohjamaa)
 - kerrospaksuuksien ja moduulien kaikki kahden muuttujan yhdysvaikutukset (paksuus*moduuli)
- muodonmuutokset:
 - päällysteen alapinnan vetomuodonmuutos
 - pohjamaan pinnan pystysuora muodonmuutos
- kantavuus
- tasaisuus (IRI)
- ilmastotiedot:
 - vuotuinen pakkasmäärä
 - pakkasmäärä * tien ikä
- ikä.

8.2.3 Vaurioitumisajankohtaa selittävät yhden muuttujan mallit

Vaurioitumismallit on laadittu erikseen sekä AB + kant. (GPS-1) että 2AB + kant. (GPS-6) kohteille. Vaurioitumisen ajankohtaa parhaiten selittävät yksittäiset muuttujat ja niiden merkitsevyystasot on esitetty taulukoissa 1 (AB + kant) ja 2 (2AB + kant). Merkitsevyyttä kuvaa suure $Pr > Chi$, joka kertoo millä todennäköisyydellä muuttujan kertoimen arvo on nolla (muuttujalla ei ole vaikutusta vaurioitumisen synnyn ajankohtaan). Mitä pienempi kuvattu luku on, sitä merkitsevämmin kyseisen muuttujan kerroin poikkeaa nolasta ja sitä enemmän se selittää vaurioitumisen syntyajankohtaa. Esim. $Pr > Chi = 0.05$ tarkoittaa, että aineistosta saatu kertoimen arvo tai itseisarvoltaan sitä suurempi arvo saadaan nollahypoteesin vallitessa 5% todennäköisyydellä. Tavallisesti tästä päätellään, että saatu tulos on nollahypoteesin vallitessa niin harvinainen, että on aihetta uskoa nollahypoteesi vääräksi. Toisin sanoen muuttuja selittää merkitsevästi kestävyyttä ($0.05=*$, $0.01=**$, $0.001=***$). Yhden muuttujan mallien kertoimet on esitetty kummallekin koetyypille erikseen liitteessä 2.

Taulukko 1: AB + kant. (GPS-1) kohteiden vaurion syntyhetken kumulatiivista kuormituskertalukua selittävät muuttujat.

SELITTÄVÄ MUUTTUJA	Merkitsevyys Pr > Chi
KKL	0.0001
AB:n paksuus * kantavan moduuli	0.0303
Kantavuus	0.0340
AB:n paksuus * pohjamaan moduuli	0.0857
SI = Σ (paksuus * moduuli)	0.1077
AB:n paksuus	0.1094
AB:n paksuus * AB:n moduuli	0.1133
Pakkasmäärä * ikä	0.1144
Pakkasmäärä (h°C/vuosi)	0.1300
Ikä (1993)	0.1657
AB:n alapinnan log10(muodonmuutos)	0.1715
IRI (1993)	0.1913

Taulukko 2: 2AB + kant. (GPS-6) kohteiden vaurion syntyhetken kumulatiivista kuormituskertalukua selittävät muuttujat.

SELITTÄVÄ MUUTTUJA	Merkitsevyys Pr > Chi
KKL	0.0001
AB:n alapinnan log10(muodonmuutos)	0.0169
Kantavuus	0.0194
AB:n paksuus	0.0597
AB:n paksuus * kantavan moduuli	0.0620
Kantavan paksuus * kantavan moduuli	0.0842
SI = Σ (paksuus * moduuli)	0.0918
Pakkasmäärä * ikä	0.1208

AB + kant. (GPS-1) kohteilla merkittävimpiä vaurioitumisajankohtaa selittäviä tekijöitä ovat vuosittainen kuormituskertaluku, päällysteen paksuuden ja kantavan kerroksen moduulin yhteisvaikutus sekä kantavuus. Tulosten perusteella havaitaan, että mitä suurempi tien kuormituskertaluku on, sitä kauemmin tie kestää ilman verkko- tai pituushalkeamia. Tähän on syynä se, että korkean liikennemäärän omaavat tiet suunnitellaan normien mukaan paksummiksi ja kantavimmiksi kuin vähäliikenteiset tiet. Näin ollen vuosittainen kuormituskertaluku pitää sisällään epäsuorasti rakennetiedot, jotka tulevat esiin mm. kantavuuden sekä päällysteen paksuuden ja kantavan kerroksen moduulin yhteisvaikutuksen kautta. Myös ilmastorasituksella on vaikutusta vaurioitumisen alkamisajankohtaan, mikä tulee esiin pakkasmäärää kuvaavan muuttujan perusteella.

2AB + kant. kohteilla (GPS-6) selittää vuosittainen kuormituskertaluku myös parhaiten vaurioitumisen ajankohtaa kuvaavaa kumulatiivista kuormituskertalukua. Tähän vaikuttaa rakenteen lujuuden lisääntyminen tien suunnitellun kuormituskerran lisääntyessä samalla tavoin kuin AB + kant. rakenteissa. Tämä ilmenee siinä, että tärkeimpiä muita vaurioitumisen ajankohtaa selittäviä muuttujia ovat 2AB + kant. rakenteilla päällysteen alapinnan vetomuodonmuutoksen suuruus ja kantavuus, jotka riippuvat suoraan rakennekerrosten paksuudesta ja materiaalien moduuleista. Tärkeimpiä vaurioitumista selittäviä rakennetekijöitä ovat puolestaan päällysteen paksuus, päällysteen paksuuden ja kantavan kerroksen moduulin yhteisvaikutus sekä kantavan kerroksen paksuuden ja moduulin yhteisvaikutus. Ilmastotekijöistä parhaiten vaurioitumisen ajankohtaa selittää tien kumulatiivinen pakkasmäärä (pakkasmäärä * ikä). Mitä pohjoisemmassa tie sijaitsee, sitä nopeammin tie vaurioituu ilmastorasituksesta johtuen. Pakkasmäärä on arvioitu tässä tutkimuksessa pakkasmääräkarttojen perusteella. Tutkimuksen myöhemmässä vaiheessa nämä tiedot tullaan korvaamaan säähavaintoasemilta mitatuilla todellisilla pakkasmäärillä.

Yhden muuttujan mallit tuottavat suuntaa antavaa tietoa niistä tekijöistä, jotka vaikuttavat vaurioitumisen syntymisajankohtaan. Tavoitteena on kuitenkin kehittää useamman muuttujan mallit, jolloin saadaan selville miten eri tekijät yhdessä vaikuttavat tierakenteen kestävyysasteeseen. Seuraavassa tarkastellaan vaurioitumisajankohtaa selittäviä kahden muuttujan malleja.

8.2.4 Vaurioitumisajankohtaa selittävät kahden muuttujan mallit

Tutkimuksessa kartoitettiin kaikki mahdolliset kahden muuttujan yhdistelmät, jotka tulevat kysymykseen vaurioitumisen ajankohtaa selittäessä. Kahden muuttujan kombinaatiot valittiin kohdassa 8.2.2 esitettyjen muuttujien perusteella.

Taulukoissa 3 (AB + kant.) ja 4 (2AB + kant.) on esitetty merkittävimmät kahden muuttujan mallit, jotka selittävät vaurioitumisen alkamisajankohdan kumulatiivista kuormituskertalukua. Mallien kertoimet on esitetty liitteessä 3.

Taulukko 3: AB + kant. (GPS-1) kohteiden vaurion syntyhetken kumulatiivista kuormituskertalukua selittävät kahden muuttujan mallit.

SELITTÄVÄT MUUTTUJAT		Merkitsevyys Pr > Chi	
Muuttuja 1	Muuttuja 2	Muuttuja 1	Muuttuja 2
KKL	AB:n paksuus * kantavan moduuli	0.0001	0.0853
KKL	AB:n alapinnan log10(muodonmuutos)	0.0001	0.2032
Pakkasmäärä (h°C/vuosi)	AB:n paksuus * kantavan moduuli	0.0324	0.0100
Pakkasmäärä (h°C/vuosi)	Kantavuus	0.0919	0.0295
Pakkasmäärä * ikä	Kantavan paksuus * kantavan moduuli	0.0330	0.0547
Pakkasmäärä * ikä	AB:n paksuus * kantavan moduuli	0.1001	0.0523
Pakkasmäärä * ikä	AB:n alapinnan log10(muodonmuutos)	0.0867	0.1763
Pakkasmäärä * ikä	Kantavuus	0.1856	0.3087
AB:n paksuus	Kantavan moduuli	0.0013	0.0358

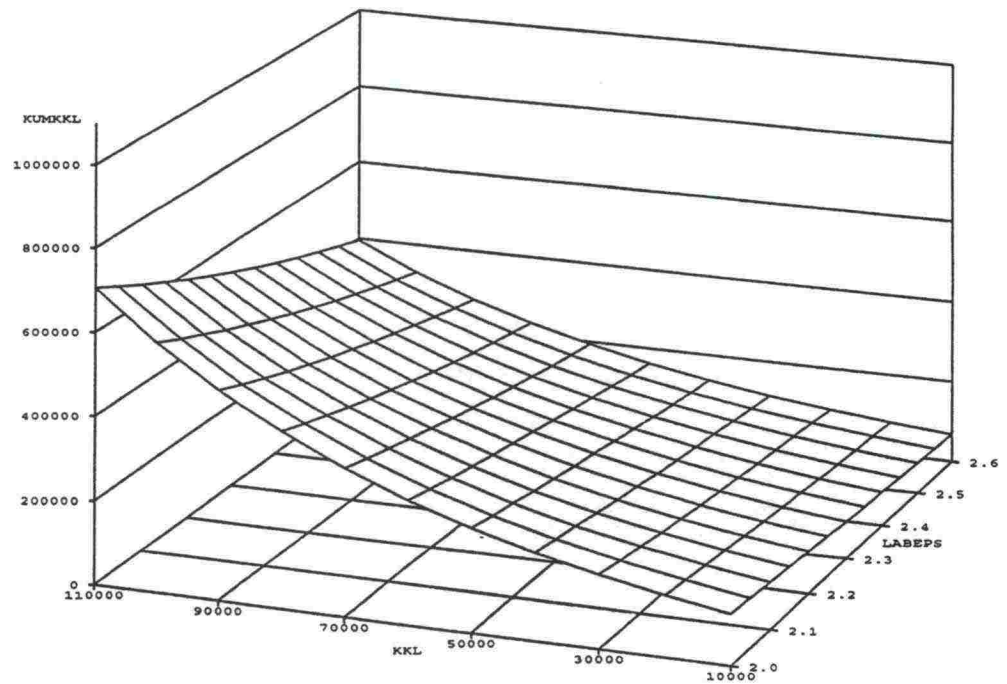
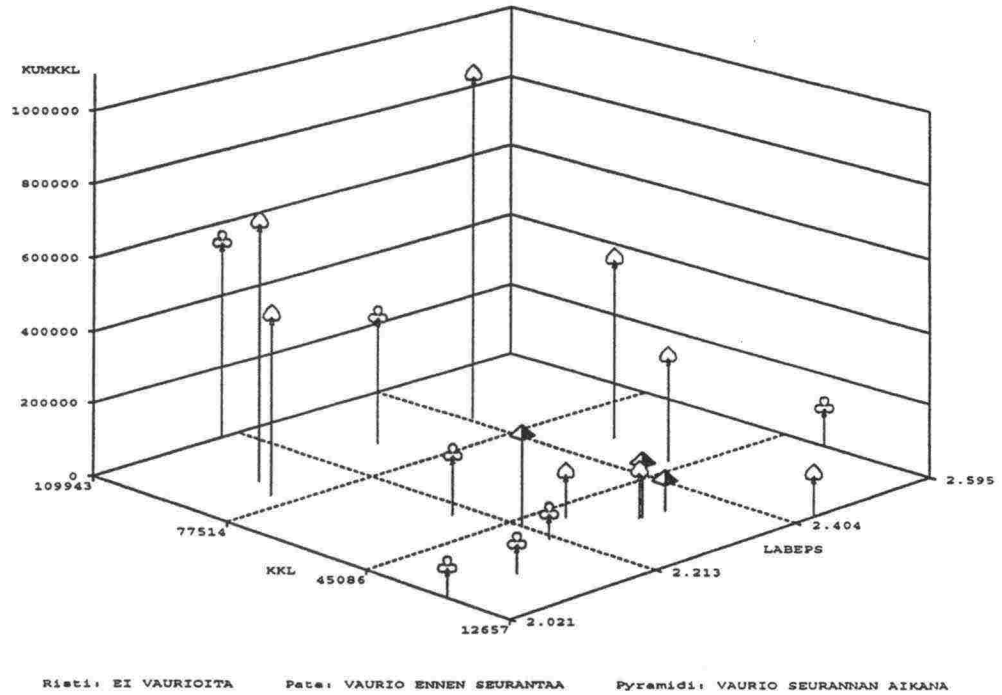
Taulukko 4: 2AB + kant. (GPS-6) kohteiden vaurion syntyhetken kumulatiivista kuormituskertalukua selittävät kahden muuttujan mallit.

SELITTÄVÄT MUUTTUJAT		Merkitsevyys Pr > Chi	
Muuttuja 1	Muuttuja 2	Muuttuja 1	Muuttuja 2
KKL	Vanhan päällysteen pakkasmäärä * ikä	0.0001	0.0807
KKL	Vanhan päällysteen kumulatiivinen KKL	0.0001	0.0126
Pakkasmäärä * ikä	AB:n alapinnan log10(muodonmuutos)	0.1589	0.1927
Pakkasmäärä * ikä	AB:n paksuus	0.1132	0.1760
AB:n paksuus	Kantavan moduuli	0.0270	0.0896

Kahden muuttujan malleja käsittelevät graafiset kuvat havaintopisteiden ja mallien osalta AB + kant. rakenteilla (GPS-1) on esitetty kuvissa 24 - 26. Kuvassa 24 on esitetty koeaineiston mittaustiedot vuosittaisen kuormituskertaluvun ja päällysteen alareunan logaritmisesti vetomuodonmuutoksen osalta pysty akselin ollessa vaurion syntyhetken kumulatiivinen kuormituskertaluku. Pata kuvaa vasemmalle sensoroituja kohteita, joissa on ollut vaurio seurannan alkaessa. Risti kuvaa kohteita, joissa ei ole esiintynyt vaurioita seurannan aikana (oikea sensorointi). Pyramidi kuvaa niiden kohteiden kumulatiivista kuormituskertalukua, jotka ovat vaurioituneet seurannan aikana.

Kuvassa 24 on esitetty myös havaintoaineistolle laaditun mallin graafinen esitys. Kuvan perusteella voidaan todeta, että vaurioitumisajankohdan kuormituskertaluku lisääntyy vuosittaisen kuormituskerran kasvaessa. Tähän liittyviä syitä on käsitelty aikaisemmin edellisessä kappaleessa. Päällysteen alareunan muodonmuutoksen suuruus vaikuttaa kestävyysasteeseen sitä enemmän, mitä korkeampi liikennemäärä on. Alhaisen liikennemäärän omaavilla teillä (alhainen kuormituskertaluku) muodonmuutoksen vaikutus on selvästi alhaisempi. Tulos on looginen, koska suuri vuosittainen kuormituskertaluku vähentää rakenteen kestoikää nopeammin heikon kantavuuden omaavilla teillä kuin rakenteellisesti vahvoilla teillä.

Mallin perusteella voidaan esimerkiksi arvioida, että suuren liikennemäärän omaavilla teillä (vuotuinen kuormituskertaluku 110000) muodonmuutoksen pieneneminen 2.6:sta 2.0:aan lisää rakenteen kumulatiivista kuormituskestävyyttä 400000:sta 700000:een (ensimmäisen halkeaman esiintymisajankohta).



Kuva 24: AB + kant. kohteiden havaintopisteet ja mallin kuvaus vuosittaisen kuormituskertaluvun (KKL) ja päällysteen alapinnan logaritmisin vetomuodonmuutoksen (LABEPS) osalta selitettävän muuttujan ollessa vaurion syntyhetken kumulatiivinen kuormituskertaluku (KUMKKL).

Kuvassa 25 on esitetty koeteiden ilmastollisten ja rakenteellisten tekijöiden vaikutus vaurioitumisen ajankohtaan. Ilmastollista rasitusta kuvaa kohteen vuotuinen keskimääräinen pakkasmäärä ($h^{\circ}C$) ja rakenteellista lujuutta kantavuus (MN/m^2). Havaintopisteiden koodit ovat samat kuin kuvassa 24.

Havaintoaineistolle laadittu malli on esitetty myös kuvassa 25. Kuvasta voidaan todeta kantavuudella olevan selvä vaikutus rakenteen kestävyysasteen alhaisilla pakkasmäärillä. Mitä suurempi ilmastorasitus on (suuri pakkasmäärä), sitä pienempi vaikutus kantavuudella on halkeamien syntymisajankohdalla. Vastaavasti voidaan havaita ilmastolla olevan pieni merkitys alhaisen kantavuuden omaavilla teillä, jolloin halkeamat syntyvät suhteellisen varhain. Sen sijaan korkean kantavuuden omaavilla teillä pakkasmäärän aleneminen lisää merkittävästi tierakenteen kykyä vastustaa halkeamien esiintymistä.

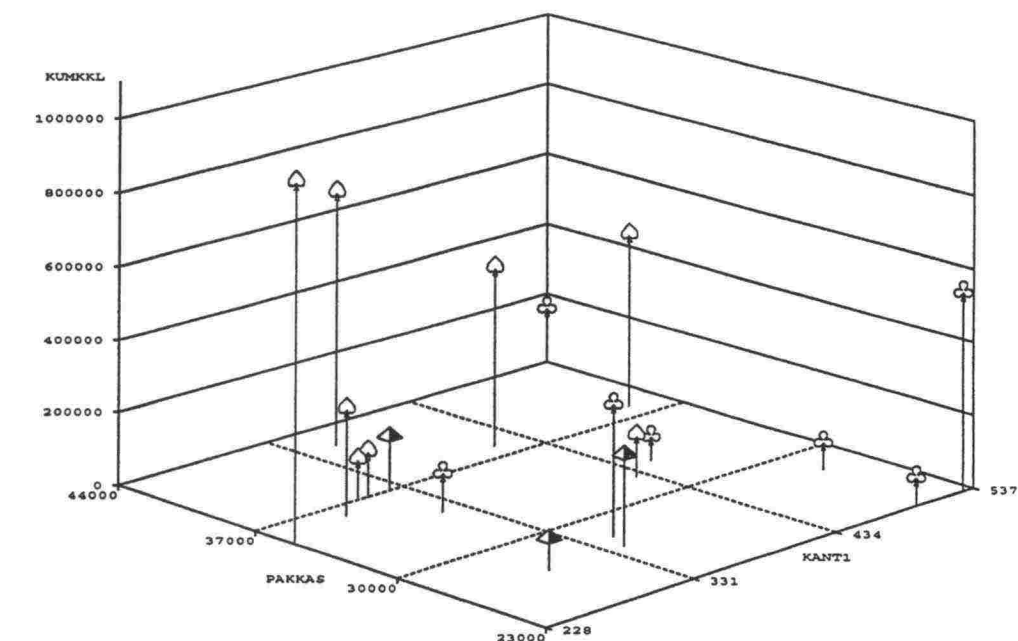
Kuvassa 26 on esitetty koeteiden havaintoaineisto ja sen perusteella laadittu malli pakkasmäärän sekä päällysteen paksuuden ja kantavan kerroksen moduulin yhteisvaikutuksen osalta.

Kuvasta voidaan todeta rakenteen kestävyysasteen lisääntyvän päällysteen paksuuden ja kantavan moduulin yhteisvaikutuksen lisääntymisen tuloksena. Kuormituskertojen kasvu on sitä voimakkaampi, mitä pienempi ilmastorasitus on (alhainen pakkasmäärä). Vastaavasti heikolla rakenteella kumulatiivinen kuormituskertaluku on alhainen pakkasmäärästä riippumatta.

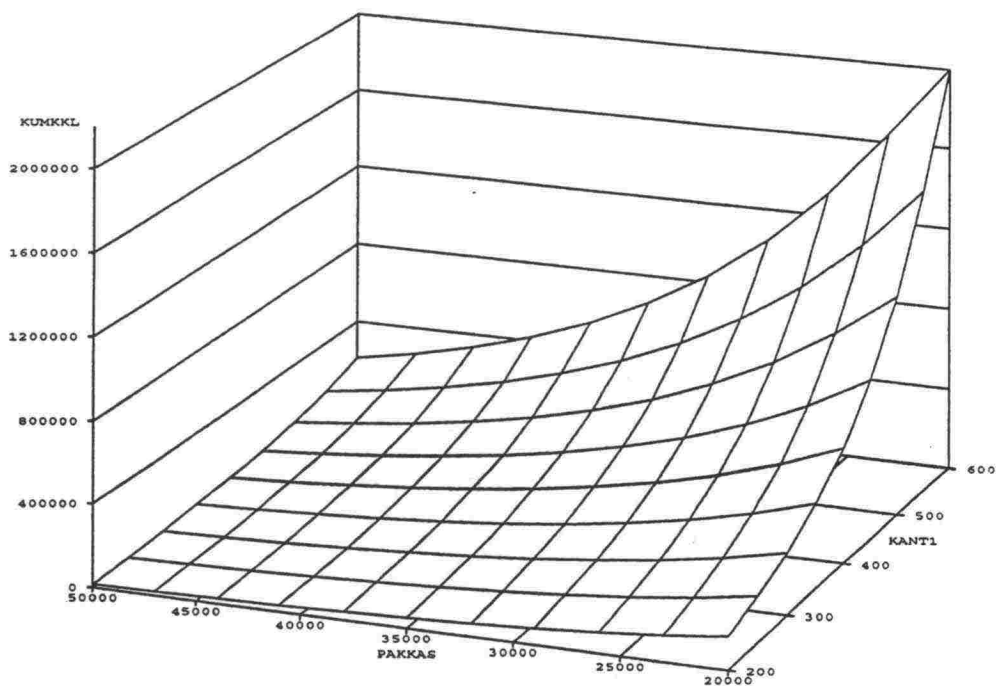
Kahden muuttujan malleja käsittelevät graafiset kuvat havaintopisteiden ja mallien osalta 2AB + kant. rakenteilla (GPS-6) on esitetty kuvissa 27 - 29.

Kuvassa 27 on esitetty havaintopisteet ja aineistolle laadittu malli vuosittaisen kuormituskertaluvun ja tien kumulatiivisen kuormituskerran osalta, joka tiellä on ollut ennen uudelleenpäällystämistä.

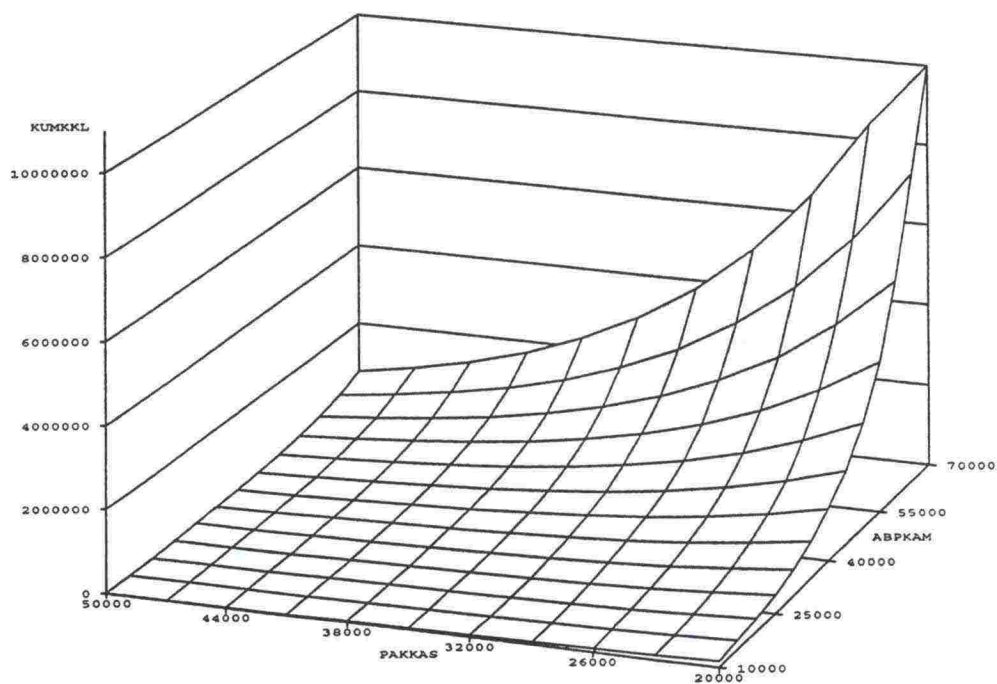
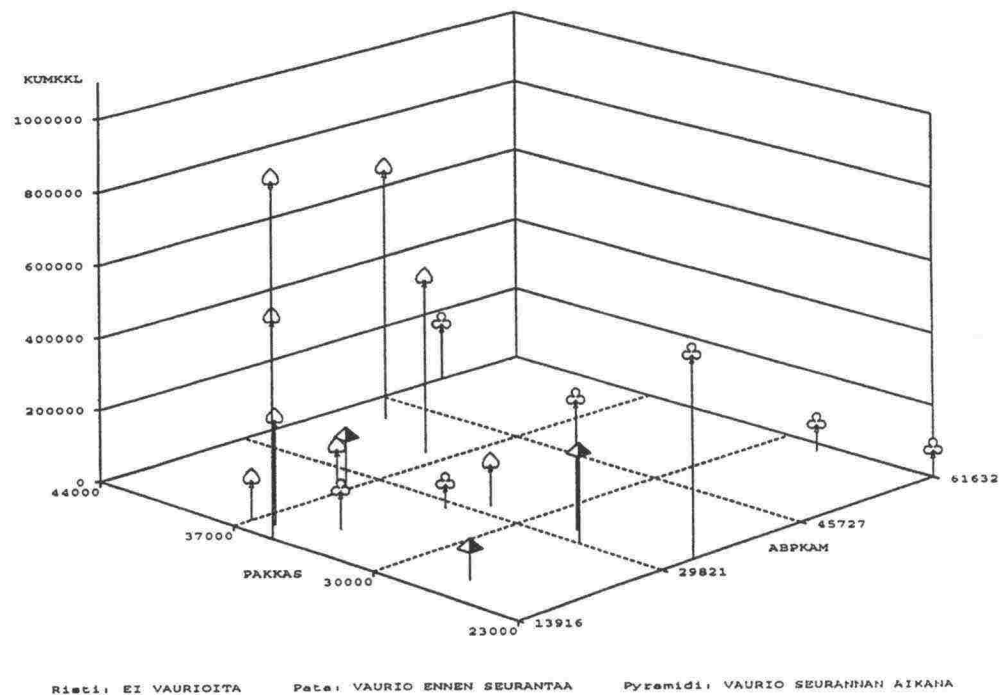
Kuvasta voidaan todeta tien vaurioitumisajankohdan kumulatiivisen kuormituskerran lisääntyvän vuosittaisen kuormituskertamäärän lisääntyessä. Tämä on yhdenmukaisen AB + kant. rakenteiden tulosten kanssa. Lisäksi voidaan havaita, että mitä suurempi kuormituskerta tiellä on esiintynyt ennen uudelleenpäällystämistä, sitä enemmän se vaikuttaa kestoikää alentavasti. Vaikutus on sitä suurempi, mitä vilkkaammin liikennöity tie on. Tämä viittaa rakenteen elinkaaren alenemiseen kuormituskertojen lisääntyessä päällystämisen välillä. Toisaalta mitä heikommassa kunnossa tie on uudelleenpäällystettäessä, sitä vähemmän rakenne kestää kuormituksia ennen uusien halkeamien syntyä. Tarkastelussa ei ole mahdollista selvittää vanhan päällysteen vaurioitumisen tasoa ja astetta uuden päällysteen halkeiluun, koska analyysissä tarvittavaa vanhan päällysteen kuntotietoa ei ole käytettävissä.



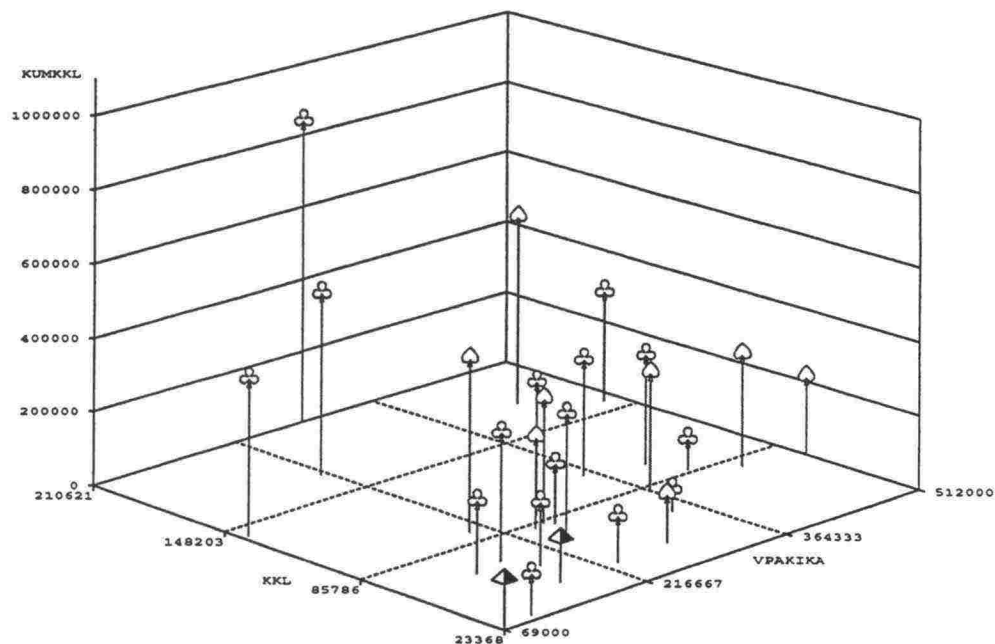
Ristit: EI VAURIOITA Peta: VAURIO ENNEN SEURANTAA Pyramidi: VAURIO SEURANNAN AIKANA



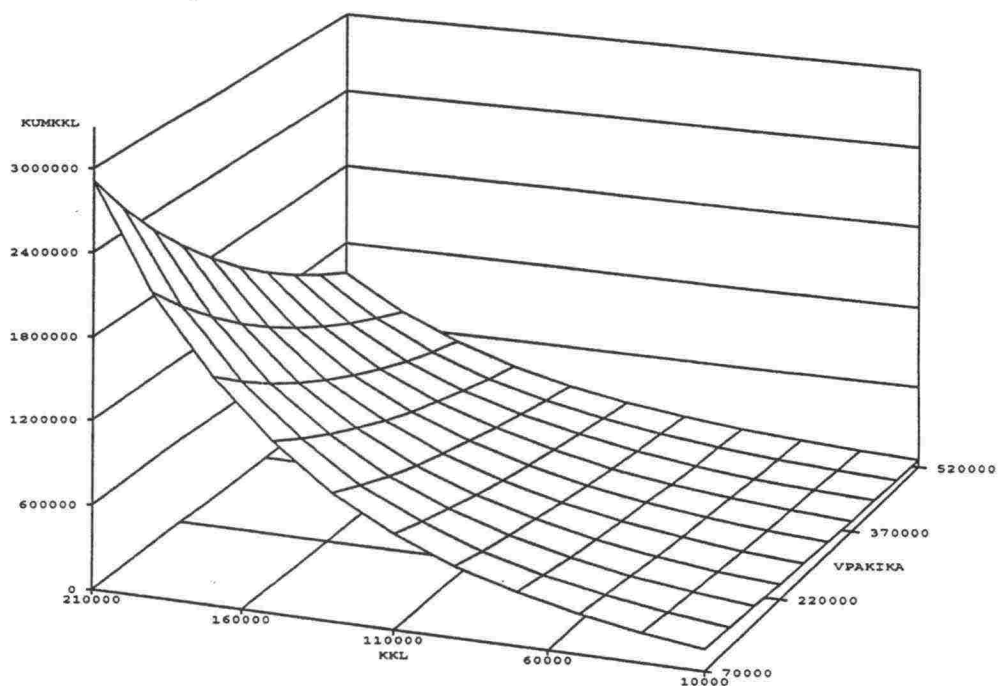
Kuva 25: AB + kant. kohteiden havaintopisteet ja mallin kuvaus pakkas-
määrän (PAKKAS) ja tien kantavuuden (KANT1) osalta selitettä-
vän muuttujan ollessa vaurion syntyhetken kumulatiivinen kuor-
mituskertaluku (KUMKKL).



Kuva 26: AB + kant. kohteiden havaintopisteet ja mallin kuvaus pakkasmäärän (PAKKAS) sekä päällysteen paksuuden ja kantavan kerroksen moduulin yhteisvaikutuksen (ABPKAM) osalta selitettävän muuttujan ollessa vaurion syntyhetken kumulatiivinen kuormituskertaluku (KUMKKL).



Risti: EI VAURIOITA Pata: VAURIO ENNEN SEURANTAA Pyramidi: VAURIO SEURANNAN AIKANA



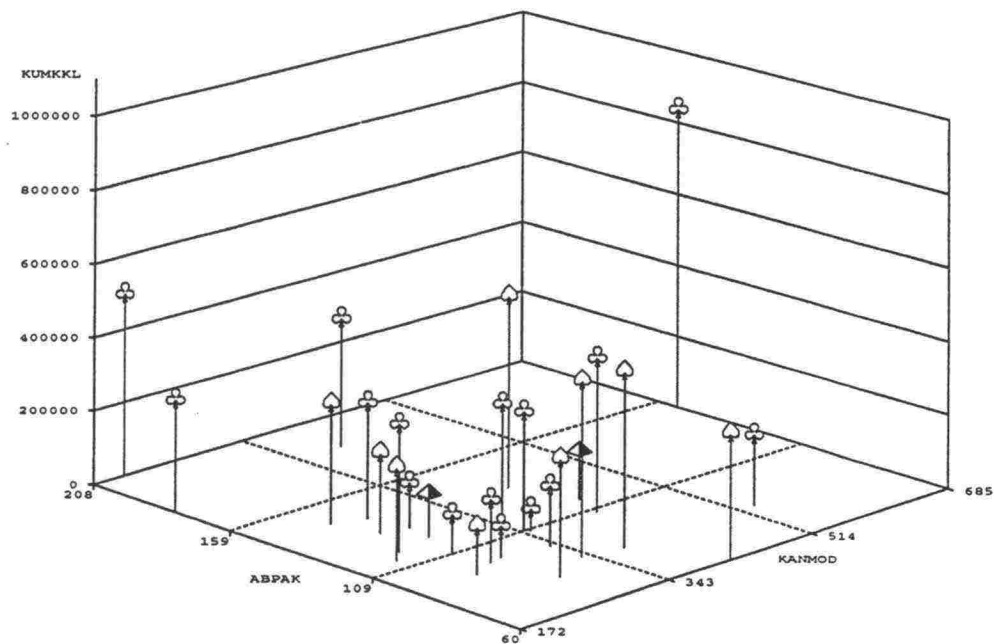
Kuva 27: 2AB + kant. kohteiden havaintopisteet ja mallin kuvaus vuosittaisen kuormituskertaluvun (KKL) ja vanhan päällysteen kuormituskertaluvun (VPAKIKKA) osalta selitettävän muuttujan ollessa vaurion syntyhetken kumulatiivinen kuormituskertaluku (KUMKKL).

Kuvassa 28 on esitetty koeteiden havaintoaineisto ja sitä kuvaava malli päällysteen paksuuden ja kantavan kerroksen moduulin osalta.

Kuvasta voidaan havaita päällysteen paksuuden ja kantavan kerroksen moduulin kasvun lisäävän selvästi kuormituskestävyyttä. Sen sijaan ohuella päällysteen paksuudella kantavan kerroksen moduulin vaikutus kestävyyteen on pieni. Vastaavasti alhaisen kantavan moduulin omaavissa kohteissa päällysteen paksuutta säätelemällä ei saavuteta suurta kuormituskestävyyttä halkeamien syntymisen osalta. Päällysteen paksuuden vaikutus kestävyyteen on selvästi suurempi korkeilla kantavan kerroksen moduulin arvoilla kuin matalilla arvoilla. Myös korkeilla kantavan kerroksen moduuliarvoilla saadaan kestävä rakenne silloin, kun päällyste on paksu.

Kuvassa 29 on esitetty koeaineiston havainnot ja sitä kuvaava malli kumulatiivisen pakkasmäärän (vuotuinen pakkasmäärä * ikä) ja päällysteen alapuolisen muodonmuutoksen (logaritmi) osalta.

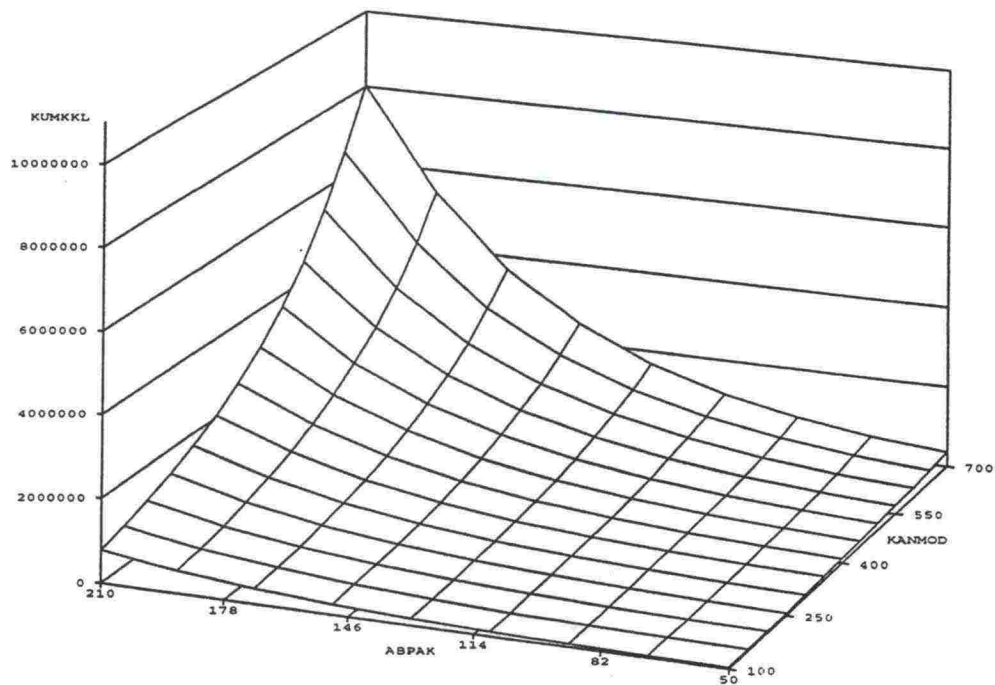
Kuvasta voidaan havaita vaurioitumisen syntymisajankohdan kumulatiivisen kuormituskertaluvun kasvavan pakkasmäärän ja muodonmuutoksen pienetessä. Kumulatiivisen pakkasmäärän ollessa korkea, ei muodonmuutoksella ole kovinkaan suurta merkitystä halkeamien syntymisajankohdan kannalta. Alhaisella pakkasmäärällä muodonmuutoksen merkitys kestävyyteen kasvaa selvästi. Tulos osoittaa, että korkealla pakkasmäärällä (Pohjois-Suomi) tierakenne vaurioituu pääasiassa ilmastollisten tekijöiden seurauksena. Vastaavasti alhaisella pakkasmäärällä (Etelä-Suomi) tien kestoikää määrävänä tekijänä on liikenteen aiheuttama rasitus.



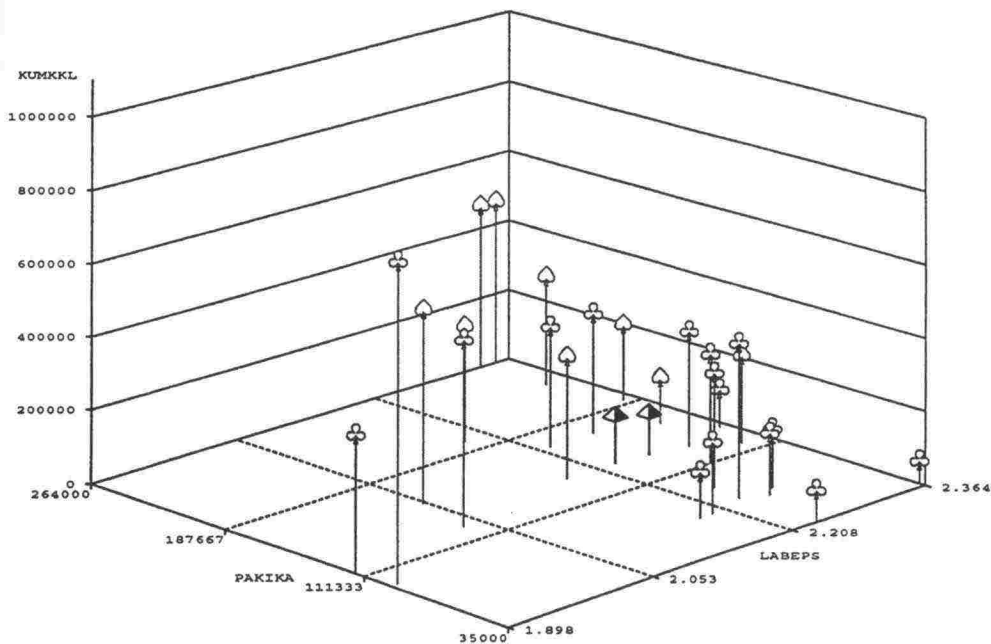
Rietti: EI VAURIOITA

Pete: VAURIO ENNEN SEURANTAA

Pyramidi: VAURIO SEURANNAN AIKANA



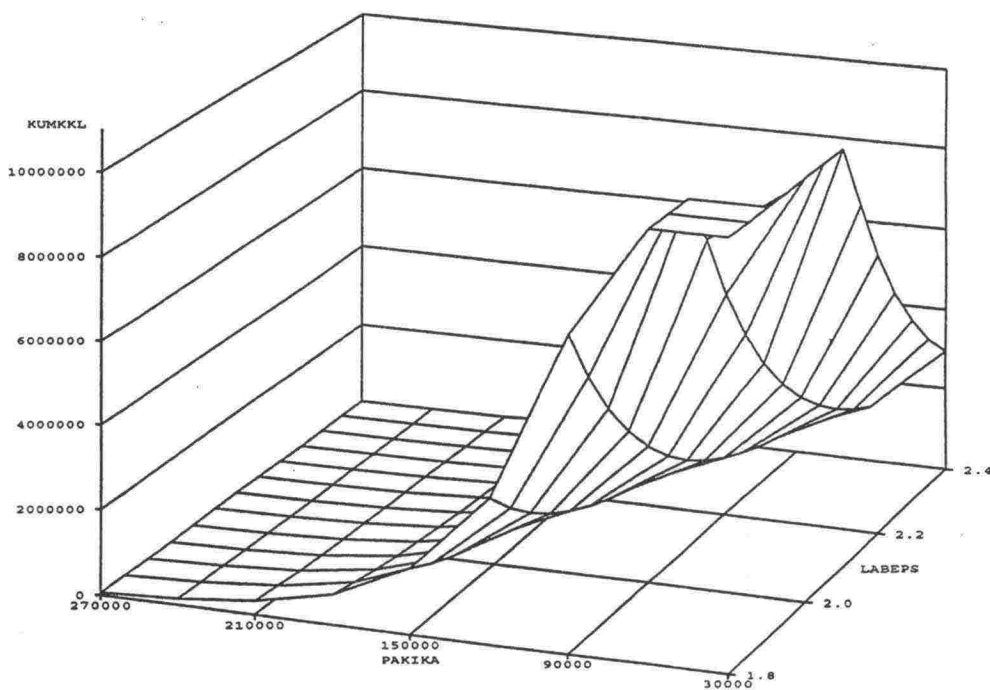
Kuva 28: 2AB + kant. kohteiden havaintopisteet ja mallin kuvaus päällysteen paksuuden (ABPAK) ja kantavan kerroksen moduulin (KANMOD) osalta selitettävän muuttujan ollessa vaurion syntyhetken kumulatiivinen kuormituskertaluku (KUMKKL).



Risti: EI VAURIOITA

Pata: VAURIO ENNEN SEURANTAA

Pyramidi: VAURIO SEURAINNAN AIKANA



Kuva 29: 2AB + kant. kohteiden havaintopisteet ja mallin kuvaus kumulatiivisen pakkasmäärän (PAKIKA) ja päällysteen alapuolisen muodonmuutoksen (LABEPS) osalta selitettävän muuttujan ollessa vaurion syntyhetken kumulatiivinen kuormituskertaluku (KUMKKL).

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Koeteiden rakennekerrosten ja pohjamaan materiaalimoduulit määritettiin käyttäen kahta toimintaperiaatteiltaan erilaista takaisinlaskentaohjelmaa (Modulus ja Elmod). Modulus-ohjelmassa kerrosmoduulien arvot etsitään sovittamalla mitatut taipumasuppilot lineaarisella monikerrosohjelmalla laskettuihin taipumasuppiloihin. Elmod on iteratiivinen takaisinlaskentaohjelma. Mitattuja taipumasuppiloita verrataan Boussinesqin yhtälöillä laskettuihin taipumasuppiloihin.

Tulokset osoittavat, että Modulus-ohjelma antaa suurempia asfaltin moduulin arvoja, kun taas Elmodilla saadaan suurempia sitomattomien rakennekerrosten ja pohjamaan moduuliarvoja. Sitomattomien kerrosten ja pohjamaan moduulin vaihtelu oli suurempaa Modulus-laskelmissa kuin Elmod-laskelmissa.

Jännitystason vaikutusta materiaalimoduuleihin tutkittiin laskemalla rakennekerrosmoduulit neljällä eri kuormitustasolla. Tiehen kohdistuva voima vaihteli välillä 27-71 kN. Kantavan kerroksen materiaali osoitti suurinta jännitysriippuvuutta. Tämä johtuu siitä, että jännitystaso ja sen muutos on suurempi kantavassa kerroksessa kuin jakavassa kerroksessa ja pohjamaassa. Jännitysriippuvuus on Elmodissa suoraviivaisempaa kuin Moduluksessa; kaikilla rakennekerroksilla moduuli kasvoi jännitystason noustessa, kun taas Modulus-laskelmissa tapahtui myös moduulin laskua jännitystason noustessa. Pohjamaa käyttäytyi samaan tapaan molemmilla ohjelmilla.

Molemmilla ohjelmilla lasketut kantavan kerroksen moduulit eri jännitystasoilla vastaavat melko hyvin vastaaville materiaaleilla laboratoriossa dynaamisella kolmiakselialikokeella määritettyjä moduuleja.

Kriittiset muodonmuutokset laskettiin lineaaris-elastisella monikerrosohjelmalla (BISAR) käyttäen Modulus-ohjelmalla takaisinlaskettuja rakennekerrosmoduuleja ja Elmod-ohjelmalla, joka laskee suoraan muodonmuutokset Boussinesqin yhtälöillä. Kahdella eri menetelmällä lasketut asfaltin alapinnan venymät ja pohjamaan yläpinnan puristumat vastasivat hyvin toisiaan.

Tutkimuksen tuloksena on kehitetty malleja, joiden perusteella voidaan arvioida tierakenteen vaurioiden syntyajankohtaa, jota kuvataan kumulatiivisen kuormituskertaluvun avulla. Mallit perustuvan eloonjäämisanalyysissä käytettyyn menetelmään. Tutkimuksessa on esitetty useita erilaisia malleja, jotka soveltuvat mallintamiseen lähtötiedoista riippuen. Muuttujina ovat mukana liikennetiedot (vuosittainen kuormituskertaluku), rakennetiedot

(kerrosten paksuudet, moduulit ja näiden yhdysvaikutukset) sekä ilmastotiedot (pakkasmäärä).

Jatkossa tulisi valita olemassa olevalta tieverkolta teitä, joilla voidaan testata mallien yleispätevyyttä. Myös havaintotiet sekä pohjoismaiden SHRP-tiet tulevat verifiointiaineistona kysymykseen.

10 KIRJALLISUUSLUETTELO

1. Scullion, T., Michalak, C., Modulus 4.0: User's Manual. Research Report 1123-4f. Texas Transportation Institute. College Station, Texas 1990.
2. Elmod/Elcon, Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design, user's manual. Dynatest Engineering A/S.Vedbaek 1989. 54 s. + liitteet 20 s.
3. Jämsä, H., Spoof, H., Strategic Highway Research Program (SHRP), Long Term Pavement Performance (LTPP): Koeteillä tehdyt mittaukset vuonna 1992 ja tierakenteen vaurioitumiseen vaikuttavat tekijät. Tielaitos, Geokeskus. Tielaitoksen selvityksiä 35/1993. Helsinki, 1993. 43 s. + liitt. 3 s.
4. Odemark, N., Undersökning av elasticitetsegenskaperna hos olika jordarter samt teori för beräkning av beläggningar enligt elasticitetsteorin. Statens väginstitut. Meddelande 77. Stockholm 1949.
5. SHRP-LTPP koeteillä tehdyt mittaukset ja tietojen tilastolliset analysointimenetelmät. Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio (TGL). Tutkimusraportti 61. Espoo, joulukuu 1991.
6. SHRP'S Layer Moduli Backcalculation Procedure, PCS/LAW Engineering, Maryland, 1992.
7. Temperature-deflection Corrections for Asphalt Pavements, Appendix L, Guide for Design of Pavement Structures. AASHTO, Washington D.C., 1986.
8. Mahoney, J. P., Newcomb, D. E., Jackson, N. C., Pierce, L. M., Pavement Moduli Backcalculation Short Course. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. Reno, Nevada 1991.
9. Rohde, G. T., Scullion, T., Modulus 4.0: Expansion and Validation of the Modulus Backcalculation System. Research Report 1123-3. Texas Transportation Institute. College Station, Texas 1990.
10. Ruotoistenmäki, A., Jämsä, H., Comparison of Modulus and Elmod backcalculation programs based on simulated deflection data. Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio (TGL). Helsinki, 1992. Julkaisematon.

11. Bonaquist, R., Witczak, M., W., Assessing the Nonlinear Behavior of Subgrades And Granular Bases From Surface Deflection Basins. Proc. 7th International conference on Asphalt Pavements, Nottingham, 1992. Vol. 2, Nottingham, 1992. s. 16-31.
12. Parker, F., Jr., Estimation of Paving Materials Design Moduli from Falling Weight Deflectometer Measurements. Transportation Research Record 1293, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1991. s. 42-51.
13. Kolisoja, P., Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet. Esiselvitysvaiheen kuormituskokeet. Tielaitos, Geokeskus. Tielaitoksen selvityksiä 39/1993. Helsinki, 1993. 71 s.
14. Kolisoja, P., Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet. Kirjallisuusselvitys. Tielaitos, Geokeskus. Tielaitoksen selvityksiä 38/1993. Helsinki, 1993, s. 70.
15. Teiden suunnittelu. IV, tien rakenne. Tie- ja vesirakennushallitus, tien-suunnittelutoimisto. Helsinki 1984.

11 LIITTEET

- LIITE 1 SHRP - LTPP koetiet
- LIITE 2 Yhden muuttujan mallit
- LIITE 3 Kahden muuttujan mallit

LIITE 1

GPS-1

	TUNNUS	PIIRI	TIE	TOSA
*	1101	1	53	16
	1103	1	113	4
	1113	4	132	11
*	1114	4	285	1
	1115	4	308	1
	1117	5	359	4
	1118	5	387	9
	1121	6	471	2
	1122	6	471	3
	1126	7	75	22
	1127	7	486	4
*	1029	8	77	32
	1130	9	604	4
*	1037	11	85	16
	1138	11	85	28
	1140	11	778	2
*	1142	12	86	18
	1143	4	347	1

* = Kohde on muuttunut GPS-6 kohteeksi.

GPS-6

	TUNNUS	PIIRI	TIE	TOSA
	1601	1	53	16
	1602	1	53	29
	1604	1	115	1
	1605	1	167	5
	1606	1	186	13
	1607	2	186	1
	1608	2	194	3
	1609	4	12	12
	1610	4	54	2
	1611	4	66	7a
	1612	4	66	7b
	1614	4	285	1
	1616	4	324	2
	1624	7	6	348
	1625	7	73	1
	1628	8	23	403
	1629	8	77	32
	1631	9	622	2
	1632	9	637	3
	1633	9	637	4
	1634	9	641	1
	1635	10	67	39
	1636	10	749	4
	1637	11	85	16
	1639	11	86	15
	1642	12	86	18
	1644	4	325	1
	1645	13	22	30
	1646	2	192	6
	1647	11	8	414

GPS-1

Selitettävä muuttuja = ln (KUMULATIIVINEN KKL) ensimmäisen vaurion syntyhetkellä.

SELITTÄVÄ MUUTTUJA	Vakiotermi	Kerroin
KKL	10.95	2.43E-5
AB:n paksuus * kantavan moduuli	10.22	6.83E-5
Kantavuus	9.72	6.43E-3
AB:n paksuus * pohjamaan moduuli	10.64	1.68E-4
SI = Σ (paksuus * moduuli)	10.71	2.09E-6
AB:n paksuus	8.31	0.0511
AB:n paksuus * AB:n moduuli	10.74	3.22E-6
Pakkasmäärä * ikä	16.00	-2.34E-5
Pakkasmäärä (h°C/vuosi)	14.62	-7.70E-5
Ikä (1993)	15.92	-0.686
AB:n alapinnan log10(muodonmuutos)	18.55	-2.81
IRI (1993)	14.88	-1.78

Esimerkiksi KKL:n malli on seuraava (katso myös kuva 23):

$$\ln (\text{KUMULATIIVINEN KKL}) = 10.95 + 0.0000243 * \text{KKL}$$

eli $\text{KUMULATIIVINEN KKL} = e^{10.95 + 0.0000243 * \text{KKL}}$

GPS-6

Selitettävä muuttuja = ln (KUMULATIIVINEN KKL) ensimmäisen vaurion syntyhetkellä.

SELITTÄVÄ MUUTTUJA	Vakiotermi	Kerroin
KKL	11.62	1.13E-5
AB:n alapinnan log10(muodonmuutos)	23.80	-4.98
Kantavuus	10.15	6.18E-3
AB:n paksuus	10.31	0.0206
AB:n paksuus * kantavan moduuli	11.20	3.98E-5
Kantavan paksuus * kantavan moduuli	10.97	2.44E-5
SI = Σ (paksuus * moduuli)	10.86	2.34E-6
Pakkasmäärä * ikä	18.67	-4.15E-5

LIITE 3

GPS-1

Selitettävä muuttuja = ln (KUMULATIIVINEN KKL) ensimmäisen vaurion syntyhetkellä.

SELITTÄVÄT MUUTTUJAT		Vakio- termi	Kerroin 1	Kerroin 2
Muuttuja 1	Muuttuja 2			
KKL	AB:n paksuus * kantavan moduuli	10.58	1.78E-5	2.35E-5
KKL	AB:n alapinnan log10(muodonmuutos)	13.44	1.78E-5	-0.965
Pakkasmäärä (h°C/vuosi)	AB:n paksuus * kantavan moduuli	12.93	-8.81E-5	7.20E-5
Pakkasmäärä (h°C/vuosi)	Kantavuus	12.15	-7.57E-5	6.50E-3
Pakkasmäärä * ikä	Kantavan paksuus * kantavan moduuli	15.73	-3.43E-5	2.28E-5
Pakkasmäärä * ikä	AB:n paksuus * kantavan moduuli	12.27	-1.72E-5	9.79E-5
Pakkasmäärä * ikä	AB:n alapinnan log10(muodonmuutos)	26.27	-2.24E-5	-4.58
Pakkasmäärä * ikä	Kantavuus	13.03	-1.66E-5	5.12E-3
AB:n paksuus	Kantavan moduuli	7.07	0.0447	4.22E-3

GPS-6

Selitettävä muuttuja = ln (KUMULATIIVINEN KKL) ensimmäisen vaurion syntyhetkellä.

SELITTÄVÄT MUUTTUJAT		Vakio- termi	Kerroin 1	Kerroin 2
Muuttuja 1	Muuttuja 2			
KKL	Vanhan päällysteen pakkasmäärä * ikä	11.97	1.47E-5	-2.43E-6
KKL	Vanhan päällysteen kumulatiivinen KKL	11.21	2.62E-5	-1.06E-6
Pakkasmäärä * ikä	AB:n alapinnan log10(muodonmuutos)	25.67	-2.63E-5	-4.16
Pakkasmäärä * ikä	AB:n paksuus	13.80	-2.97E-5	0.0256
AB:n paksuus	Kantavan moduuli	9.08	0.0195	3.88E-3

TIEHALLITUKSEN SISÄISIÄ JULKAISUJA

- 5/1991 Massanvaihdon korvaaminen moreenitukiseinällä. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 6/1991 Havupuuhaake pengertäytteenä. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 13/1991 Tieverkkojen asentaminen, käytännön ohjeita. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 16/1991 Asfalttimassan suhteltus Marshal-menetelmän mukaan. Geopalvelukeskus
- 17/1991 Murskeen muodonmuutosominaisuudet tien rakennekerroksissa. Geopalvelukeskus
- 23/1991 Betonipäällysteiden seuranta; Raportti suunnittelusta ja rakentamisesta. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 32/1991 Moreenin käyttö tierakenteissa. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 39/1991 Koerakenteita turve- ja selltipehmeikölle. Geokeskus, Oulun kehitysyksikkö
- 20/1992 Vanhojen tienrakennekerrosten uudelleen käyttö. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 26/1992 Kalliomurskeiden käyttö sitomattomissa rakennekerroksissa, esiselvitys. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 42/1992 Pehmeikölle perustettavan tiepenkereen geotekniset laskelmat. Geopalvelukeskus
- 43/1992 Pehmeikölle rakennettavien tieleikkausten geotekniset laskelmat. Geopalvelukeskus
- 44/1992 Saven varaan perustetut alikulkukäytävät. Geopalvelukeskus

TIELAITOKSEN SISÄISIÄ JULKAISUJA

- 32/1993 V-poikkileikkaus ja teräsverkot tierakenteissa; Tulokset V-poikkileikkauksen ja teräsverkkojen käyttökokeista tien pituussuuntaisten halkeamien ehkäisyssä. TIEL 4000043
- 48/1993 Geopalveluiden maksu- ja mittausperusteet; Geopalveluyksiköiden tuloslaskelmat. TIEL 4000049

TIELAITOKSEN TUTKIMUKSIA

- 4/1992 Tiepenkereen holvautuminen, loppuraportti. TIEL 3100005
- 5/1993 Arktinen tienrakentaminen. TIEL 3100011

TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 1/1992 Pystyjojanauhojen laatuvaatimukset; laadunvalvonta ja testausmenetelmät. TIEL 3200057
- 31/1992 Pohjaveden maatiivistesuojan tiivistäminen. TIEL 3200086
- 46/1992 Syvästabiloinnin laadunvalvontaohje. TIEL 3200099
- 62/1992 Hienoaineksen vaikutus stabiloidun moreenimurskeen pakkaskestävyyteen. TIEL 3200112
- 68/1992 Tien pohja- ja päällysrakenteet -tutkimusohjelma (TPPT), perussuunnitelma. TIEL 3200118
- 69/1992 Rakennettujen ja perusparannettujen teiden tasaisuus. TIEL 3200119
- 78/1992 PTM-auton tuottamien tunnuslukujen käyttökelpoisuus ja vertailtavuus sekä niiden yhteys Laser-mittauksiin (IRI, IRI4, PI/Laser). TIEL 3200134

TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 8/1993 Sitomattoman kantavan kerroksen rakentaminen. TIEL 3200135
- 15/1993 Masuunikuonan käyttö sitomattomissa päällysrakennekerroksissa. TIEL 3200142
- 16/1993 Betonipäällysteen seuranta; Vt 4 Kempele-Kiviniemi, seurantaraportti nro 1. TIEL 3200144
- 19/1993 Teiden kuntoa ja palvelutasoa koskeva seurantatutkimus. TIEL 3200145
- 20/1993 Moreeni ja sen käyttö. TIEL 3200146
- 26/1993 Bentonitiittimattojen ja muovikavojen kelpoisuus pohjaveden suojaukseen, tutkimuksia ja suosituksia. TIEL 3200152
- 34/1993 Kalliomurskeiden tiivistyminen ja hienoneminen, esitutkimus. TIEL 3200159
- 36/1993 Palaturpeen käyttö lämmöneristeenä, raportti koerakenteiden rakentamisesta. TIEL 3200161
- 38/1993 Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet; Kirjallisuusselvitys. TIEL 3200163
- 39/1993 Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet; Esiselvitysvaiheen kuormituskokeet. TIEL 3200164
- 40/1993 Teiden tasaisuusmittareiden vertailu; PTM:n, Roadmanin ja Dipstickin laitevertailu sekä epätasaisuuksien vaikutus tierasitukseen. TIEL 3200165
- 41/1993 Stabiloidun materiaalin maksimiraekoon sekä koekappaleen koon ja muodon vaikutus puristuslujuuteen. TIEL 3200166
- 47/1993 Väsymissuorat tierakenteen mitoitusta varten. TIEL 3200172
- 59/1993 Valtatie 3 routamitoitus routanousun mukaan välillä Riihimäki P - Virala. TIEL 3200184
- 60/1993 Jännitys- ja muodonmuutosmittaukset tierakenteessa 1991-1992; Pohjaveden pinnan vaikutus, tienpinnan taipumamittaus eri lämpötiloissa, vertailu standardi paripyörä - Neste Oy:n kantavuusradan pyörä. TIEL 3200185
- 68/1993 Kuitukankaat tienrakennuksessa; Uudistetun VTT-GEO luokituksen mukaiset laatuvaatimukset. TIEL 3200193
- 71/1993 Nonwoven Geotextiles in Road Constructions. TIEL 3200193E
- 76/1993 Rakennettujen ja perusparannettujen teiden tasaisuus 1992-1993. TIEL 3200200
- 77/1993 Moreenin jalostaminen. TIEL 3200201

Geotekniikan informaatiojulkaisuja:

- 2/1993 Massanvaihto. TIEL 3200127
- 21/1993 Pengerpaalutus. TIEL 3200147
- 23/1993 Pohjanvahvistusmenetelmän valinta. TIEL 3200149
- 24/1993 Tiegeotekniikan yleiset mitoitusperusteet. TIEL 3200150

ISSN 0788-3722
ISBN 951-47-8772-2
TIEL 3200213